



KOLMAS ULOTTUVUUS

Materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuudet
designpainotteisessa koru- ja jalometalliteollisuudessa

Koulutusala Kulttuuriala	
Koulutusohjelma Muotoilun koulutusohjelma	
Työn tekijä Sanna Hindsberg	
Työn nimi Kolmas ulottuvuus – Materiaalia lisäävän valmistuksen mahdollisuudet designpainotteisessa koru- ja jalometalliteollisuudessa	
Päiväys	20.05.2016 Sivumäärä 35
Ohjaaja Risto Nylund	
Yhteistyökumppani Saurum Osakeyhtiö	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön aiheena on materiaalia lisäävä valmistus, eli tuttavallisemmin 3D-tulostus, muotoilun ja teollisen tuotannon viitekehyksessä ja tarkennettuna lopuksi koru- ja jalometallialaan. Aihealueeseen perehdytään sen tarjoamien uusien mahdollisuuksien, hyötyjen ja kyseisen ammattialan tarkoitusta palvelevien sovelluskohteiden kautta.</p> <p>Työn pohjana toimii tekijän palkkatyö 3D-suunnittelijana designkoruja sarjatuotantona valmistavan yrityksen palveluksessa. Tavoitteena opinnäytetyöllä on tekijänsä henkilökohtaisen ammattitaidon ja -tietämyksen laajentaminen materiaalia lisäävää valmistusta ja sen oman alan sovelluskohteita koskevaksi. Työn päämääränä on ymmärtää teknologian toimintaperiaatteet ja sillä tuotettujen kappaleiden ominaisuudet tasolla, jonka pohjalta on prosessin jälkeen mahdollista tehdä perusteltuja päätöksiä tekniikan mahdollista hyödyntämistä koskien.</p> <p>Opinnäytetyön teoriaosuus koostuu selkeästä ja tiivistä kuvauksesta materiaalia lisäävän valmistuksen perustoimintaperiaatteista sekä sen potentiaalisista hyödyistä muotoilijan, teollisen tuotannon ja tarkemmin jalometallialan näkökulmasta. Tähän osioon on tuotettu myös huomattava määrä graafista havainnemateriaalia tukemaan niin lukijan kokonaiskuvaa, sekä edesauttamaan tekijän omaa visuaalista ja soveltavaa oppimistapaa. Valmistustekniikan mukanaan tuomia uusia muotoilullisia mahdollisuuksia on havainnollistettu tuottamalla korukonsepti algoritmiavusteisen suunnittelun keinoin. Tästä konseptista on myös teoriaosuuden perusteella relevanteiksi valikoituneilla tekniikoilla tuotettu kolme fyysistä mallikappaletta.</p>	
<p>Avainsanat:</p> <p>Materiaalia lisäävä valmistus, 3D-tulostus, tuotesuunnittelu, koru- ja jalometallimuotoilu</p>	

Field of Study Culture		
Degree Programme Degree Programme in Design		
Author Sanna Hindsberg		
Title of Thesis The Third Dimension – The Possibilities of Additive Manufacturing in Design Oriented Jewelry and Precious Metal Industry		
Date	20.05.2016	Pages 35
Supervisor Risto Nylund		
Partner Saurum Osaakeyhtiö		
<p>Abstract</p> <p>The subject of this thesis is additive manufacturing, more commonly known as 3D printing, in the context of design, industrial manufacturing and finally targeted at jewelry and precious metal industry. The theme is covered from the standpoint of its new possibilities, advantages and the applications relevant to the field in question.</p> <p>The author's profession as a 3D-Designer within a company producing mass manufactured design jewelry provided a basis for this thesis. The objective of the thesis was to expand the author's professional expertise and knowledge to cover additive manufacturing and its suitable applications for her own industry. The aim was to understand the principles of the process and the properties of the pieces produced by it on a level which makes it possible in the future to make justified decisions about the possible utilization of the technology.</p> <p>The theory section of the thesis consists of an explicit and compact description of the basic principles of additive manufacturing and its potential advantages from the perspective of designers, industrial manufacturing and more specifically precious metal industry. Also a significant amount of illustrative graphical material was produced to this section to support the reader and also the author's own visual and applied way of learning. The new possibilities provided by the manufacturing techniques are demonstrated by producing a jewelry concept by algorithm-aided design. This concept has also been used for manufacturing three physical sample models with techniques proven relevant by the theory section.</p>		
<p>Keywords:</p> <p>Additive manufacturing, 3D printing, product design, jewelry and precious metal design</p>		

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	4
2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS.....	5
2.1 MÄÄRITELMÄ.....	5
2.2 PINNALLE NOUSU.....	7
2.2.1 Teknologiset läpimurrot.....	8
2.2.2 Julkisuus.....	8
2.2.3 Maker movement	9
3 3D-TULOSTUKSEN MAHDOLLISUUDET.....	10
3.1 MUODON VAPAUS	10
3.2 TUOTANNOLLISET EDUT.....	12
3.3 VIHREÄ NÄKÖKULMA.....	14
3.4 OIKEA LÄHESTYMISTAPA.....	14
4 CAD to CAM.....	15
4.1 TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU, CAD	15
4.1.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu, AAD	16
4.1.2 STL.....	19
4.2 ORIENTAATIO JA TUKIRAKENTEET	20
4.3 VIIPALEMALLI	21
4.4 TIETOKONEAVUSTEINEN VALMISTUS, CAM.....	22
4.4.0 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS, AM	22
4.4.1 Laminointi	22
4.4.2 Materiaalin pursotus.....	22
4.4.3 Allasvalopolymerisaatio.....	23
4.4.4 Materiaalin ruiskutus	23
4.4.5 Materiaalin ja lämmön kohdistus	24
4.4.6 Jauhepetiteknikka.....	24
4.4.7 Sideaineen ruiskutus.....	25
5 AM-TEKNIikka JALOMETALLIALALLA.....	26
5.1 PROTOTYYPIIT	26
5.2 VALUAIHIOT.....	27
5.3 METALLISET LOPPUTUOTTEET.....	28
6 POHDINTA.....	31
LÄHTEET	33
TUOTETUT AINEISTOT	34

1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni aiheena on materiaalia lisäävä valmistus, eli tuttavallisemmin 3D-tulostus, muotoilu ja teollisen tuotannon viitekehyksessä ja tarkennettuna lopuksi koru- ja jalometallialaan. Aihealueeseen perehdytään sen tarjoamien uusien mahdollisuuksien, hyötyjen ja oman ammattialan tarkoitusta palvelevien sovelluskohteiden kautta.

Työn pohjana toimii oma palkkatyöni 3D-suunnittelijana Saurum Osakeyhtiön palveluksessa, jonka pääasiallisena toimialana on designkorujen sarjavalmistus tehdasympäristössä. Henkilökohtainen työkuvani koostuu pääosin Lumoava-tuotemerkin korujen 3D-mallintamisesta, joko suunnittelijan piirtämän luonnoksen tai käsin tekemän prototyypin pohjalta. Tämän lisäksi tehtäviini kuuluu uusien, valuprosessia tuotannossaan hyödyntävien korumallien vaha-aihioiden CNC-jyrsintä, joista voidaan suoraan valaa metalliin sarjatuotantovaiheen ensimmäinen askel, niin kutsuttu masterkappale. Koulutuspohjani lisäksi tätä kautta vahvasti kehittynyt tietotaito tietokoneavusteisesta suunnittelusta ja perinteisestä tietokoneavusteisesta valmistuksesta ohjaavat vahvasti opinnäytetyöprosessia.

Pyrimme työpaikkani tuotekehitysosastolla mahdollisimman pitkälle suunnittelemaan korujen rakenteen ja muodolliset ratkaisut enemmän designin näkökulmasta kuin valmistuskaaren ehdoilla. Olemmekin näin päätyneet teettämään koko ajan suurenevan lukumäärän tuotannon masterkappaleiden vaha-aihoista alihankintana 3D-tulostamalla. Tätä kautta olen päässyt tutustumaan kyseisen teknologian uusiin mahdollisuuksiin yhdestä näkökulmasta, nimenomaan osana jalometallialan teollista tuotantokaarta. Potentiaalisia sovelluskohteita ja -tapoja löytyy varmasti enemmänkin alalta, ja mahdollisesti myös Saurum Osakeyhtiön tuotantokaareltä. Tämän sekä henkilökohtaisen kiinnostukseni kyseiseen teknologiaan pohjalta päätin opinnäytetyönäni perehtyä aihealueeseen aikaisempaa syvällisemmin. Tarkoitukseni ei kuitenkaan tämän opinnäytetyön puitteissa ole kartoittaa mahdollisia uusia käyttötapoja mainitun yrityksen näkökulmasta, vaan tutustua niihin enemmän yleisellä tasolla osana muotoiluprosessia, teollista tuotantokaarta ja jalometallialaa.

Tavoitteena opinnäytetyölläni on oman ammattitaitoni ja -tietämykseni laajentaminen materiaalia lisäävää valmistusta ja sen oman alani sovelluskohteita koskevaksi. Päämääränä on ymmärtää teknologian toimintaperiaatteet ja sillä tuotettujen kappaleiden ominaisuudet tasolla, jonka pohjalta olisi prosessin jälkeen mahdollista tehdä perusteltuja päätöksiä tekniikan mahdollista hyödyntämistä koskien. Näkisin opinnäytetyöni valmistumisen jälkeen pystyväni myös kartoittamaan työllistävän yritykseni potentiaaliset mahdollisuudet hyödyntää 3D-tulostustekniikkaa nykyistä laajemmin.

Opinnäytetyöni teoriaosuus koostuu selkeästä ja tiiviistä kuvauksesta materiaalia lisäävän valmistuksen perustoimintaperiaatteista sekä sen potentiaalisista hyödyistä muotoilijan, teollisen tuotannon ja tarkemmin jalometallialan näkökulmasta. Aineisto on tuotettu tarkkaan harkittujen kirjallisten ja suullisten lähteiden pohjalta. Tähän osioon on tuotettu myös huomattava määrä graafista havainnemateriaalia tukemaan niin lukijan kokonaiskuvaa, sekä edesauttamaan tekijän omaa visuaalista ja soveltavaa oppimistapaa. Kuvitettu esittely tekniikasta ja sen mahdollisuuksista on tässä siis syntyvänä aineistona tuotos itsessään, joka potentiaalisesti voi hyödyttää muitakin aiheesta kiinnostuneita henkilöitä.

Valmistustekniikan mukanaan tuomia uusia muotoilullisia mahdollisuuksia on päätetty havainnollistaa tuottamalla korukonsepti algoritmivusteisen suunnittelun keinoin. Tässä kappaleet muotoillaan luomalla eräänlainen kaava, johon syötettyjä muuttujia muokkaamalla voidaan interaktiivisesti muodostaa karkean alkumääritelmän sisään sopivia muunnelmia samasta objektista. Kyseinen metodi havaittiin opinnäytetyön tekovaiheessa valmistustekniikkaan nähden hyödylliseksi totuttujen suunnittelullisten kaavojen ja henkisten rajoitteiden kaatamiseksi.

Koska työ käsittelee pohjimmiltaan konkreettisten kappaleiden valmistamista, on teoriaosuuden perusteella relevanteiksi valikoituneilla tekniikoilla tuotettu myös fyysiset esimerkit tuotekonseptista. Näissä valmistajina on hyödynnetty alan parhaiksi nähtyjä suomalaisia toimijoita.

2 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS

3D-tulostus on puhekieleen vakiintunut termi joukosta valmistustekniikoita, jotka virallisemmin sijoitetaan otsikon *materiaalia lisäävä valmistus* alle. Kyseinen on suomenos sanoista *additive manufacturing*, joista juontuu myös kolmas suomen kielessä käytetty nimitys *AM-tekniikka*. (FIRPA ry. n.d.) Tässä opinnäytetyössä pyritään jäsentämään sisällön asiapainotteisuutta käyttämällä teknisemmissä osioissa Suomen Pikavalmistusyhdistys FIRPA ry:n suosittelemaa termiä materiaalia lisäävä valmistus, sekä AM-tekniikka, ja kevyemmissä, yleisluontoisemmissa osissa valtavirran ja median suosimaa sanaa 3D-tulostus.

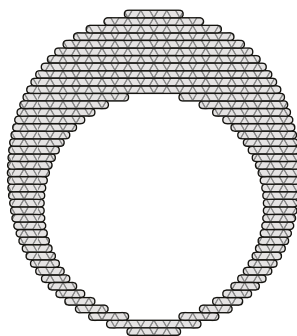
2.1 MÄÄRITELMÄ

3D-tulostus ei ole yksittäinen tekniikka, vaan kategoria sulkee sisäänsä monia erilaisia valmistustapoja, joilla on tiettyjä yhdenmukaisia piirteitä. Tärkein näistä on virallisen terminkin määrittämä valmistuksen *lisävyys*, jonka tähdentämiseksi voidaan niin kutsuttuja perinteisiä valmistusmenetelmiä nimittää *materiaalia poistavaksi valmistukseksi* (Lipson & Kurman 2013, 2.1). Näissä prosessi aloitetaan tietynkokoisesta raaka-aineaihiosta, josta tavalla tai toisella poistetaan ylimääräinen massa halutun muodon aikaansaamiseksi. Materiaalia lisäävä valmistus taas aloittaa käytännössä tyhjästä tilasta, johon materiaalia lisätään vain tarvittaviin kohtiin.

Toinen tunnusomainen piirre kaikille 3D-tulostustekniikoille on niiden lähtökohta. Laitteet yhdistävät materiaalia valmistaakseen kappaleita tietokoneelta tulevan kolmiulotteisen, virtuaalisen datan pohjalta. (Caffrey & Wohlers 2015, 32.) Tietokoneet ja niillä luodut 3D-mallit näyttelevät siis kriittistä roolia prosessissa; ilman hyvin suunniteltua elektronista pohjapiirrosta tulostin on yhtä hyödytön kuin vaikkapa iPod ilman musiikkia (Lipson & Kurman 2013, 2.1).

3D-tulostusta luonnehditaan usein myös kerroksittaiseksi prosessiksi ja kaikki tällä hetkellä markkinoilla olevat laitteet rakentavatkin tulostamansa kappaleet kerros kerrokselta (Gibson, Rosen & Stucker 2015, 1.4.3). Tämä tapahtuu seuraavasti:

3D-tulostin, tietokoneelta tulevia ohjeita noudattaen, ruiskuttaa tai kiinteyttää jauhattua, sulaa tai nestemäistä materiaalia tietynmallisiin litteisiin, päällekkäisiin kerroksiin. Näiden kerrosten muodon määrittävät 3D-mallitiedostosta luodut poikkileikkaukset ja korkeuden käytettävän tulostimen tarkkuus. Lopputuloksena pinotuista ohuista kerroksista rakentuu kolmiulotteinen esine. (Gibson ym. 2015, 2.5; Lipson & Kurman 2013, 2.1.)



Kuvanto 1. Kerroksittaisuus (Hindsberg 2016-04-23)

Vaikka kaikki nykyiset 3D-tulostamiseksi kutsuttavat teknologiat hyödyntävätkin mainittua kerroksittaista lähestymistapaa, tämä ei ole välttämätön ominaisuus lisäävällä valmistukselle. Tulevaisuudessa samaan kategoriaan saatetaan sijoittaa muillakin periaatteilla toimivia valmistusmenetelmiä ja 3D-tulostuksen onkin määritelty tapahtuvan *useimmiten kerros toisensa päälle* (ISO/ASTM 52900:2015, 2.1.2).

Edellä olevaan kuvaukseen sopivia valmistustapoja on hyvin laaja kirjo, osa vain hieman toisistaan eroavia. Kun tähän vielä lasketaan mukaan lukemattomat eri materiaalivaihtoehdot, tulee määrästä huomattavan suuri. Lisäksi monet yritykset ovat nimenneet eriävillä termeillä omia, kilpailijansa kanssa teoriassa identtisiä valmistusprosessejaan erottuakseen markkinoilla. (Caffrey & Wohlers 2015, 32.)

AM-tekniikkaa hyödyntäviä valmistustapoja standardisoimaan onkin luotu kahden maailman suurimman kansainvälisen standardeja kehittävän järjestön, ASTM Internationalin sekä The International Organization of Standardizationin toimesta omat komiteat: *The ASTM International committee F42 on Additive Manufacturing Technologies* ja *ISO/TC 261 on Additive Manufacturing*. Kyseiset jaostot ovat hyväksyneet alalla seuraavan laajalti käytössä olevan seitsemän kohdan kategorisoinnin ja määritelmät kunkin kohdan alle sijoittuvista teknologioista:

Allasvalopolymerisaatio, engl. Vat Photopolymerization

Materiaalia lisäävä valmistusprosessi, jossa altaassa olevaa nestemäistä hartsia kovetetaan selektiivisesti valosta aktivoituvalla polymerisaatiolla.

Jauhepetiteknikka, engl. Powder Bed Fusion

Materiaalia lisäävä valmistusprosessi, jossa lämpöenergialla selektiivisesti sulatetaan yhteen pulveripedin alueita.

Laminointi, engl. Sheet Lamination

Materiaalia lisäävä valmistusprosessi, jossa materiaaliarkkeja liitetään toisiinsa objektin muodostamiseksi.

Materiaalin ja lämmön kohdistus, engl. Directed Energy Deposition

Materiaalia lisäävä valmistusprosessi, jossa materiaalia yhdistetään sulattamalla kohdistetulla lämpöenergialla samalla kun sitä annostellaan.

Materiaalin pursotus, engl. Material Extrusion

Materiaalia lisäävä valmistusprosessi, jossa materiaalia annostellaan selektiivisesti suuttimen tai aukon läpi.

Materiaalin ruiskutus, engl. Material Jetting

Materiaalia lisäävä valmistusprosessi, jossa rakennusmateriaalipisaroita annostellaan selektiivisesti.

Sideaineen ruiskutus, engl. Binder Jetting

Materiaalia lisäävä valmistusprosessi, jossa nestemäistä sideainetta annostellaan selektiivisesti yhdistämään jauhemateriaalia.

(ISO/ASTM 52900:2015, 2.2.)

(Termien suomennot: FIRPA ry. & Lehtinen 2014.)

Yllä määritellyt prosessit esitellään tarkemmin osiossa 4.4

"– 3d printing that has the potential to revolutionize the way we make almost everything"
Barack Obama 2013

2.2 PINNALLE NOUSU

Maailmassa on muutaman viime vuoden vallinnut huomattava kiinnostus 3D-tulostamista kohtaan. Valmistustekniikkakokonaisuutta on monessa yhteydessä nimitetty jopa kolmanneksi teolliseksi vallankumoukseksi (Boivie 2016). 3D-tulostimet eivät kuitenkaan ole uusi keksintö, vaan niiden määritelmään sopivat laitteet ovat olleet osa tuotantoteollisuuden konepajoja jo vuosikymmeniä (Lipson & Kurman 2013, 2.1). Teknologian viimeaikainen niin sanottuun yleiseen tietoisuuteen nousu onkin ollut monen tekijän summa.

2.2.1 Teknologiset läpimurrot

3D-tulostuksen käyttö on räjähdysmäisesti lisääntynyt viime vuosina, johtuen suurilta osin kyseisen ja muun siihen liitoksissa olevan teknologian nopeatempoisesta kehityksestä. Laitteista on verrattain lyhyessä ajassa tullut niin tehokkaampia, halvempia kuin helpompikäyttöisempiäkin. (Lipson & Kurman 2013, 2.1.)

3D-tulostuksen nousu varteenotettavaksi valmistustavaksi voidaan laskea monen eri teknologiasektorin kehityksen tulokseksi. Kaiken pohjana toimii kuitenkin tietokoneiden laskentatehon huomattava lisääntyminen, sekä esimerkiksi massamuistin kehittyminen ja halpeneminen. Jo viime vuosituhannen lopun keksinnöt, kuten mikropiiri ja transistori, ovat luoneet alustan, jonka päälle koneista onnistutaan jatkuvasti rakentamaan nopeampia, pienempiä ja halvempia sekä suuremmalla toiminnallisuudella varustettuja. Tämä mahdollistaa 3D-tulostuksen lähtökohtana toimivan, normaalisti huomattavan raskaan, 3D-tiedoston luomisen ja käsittelyn kohtuullisessa aikakehyksessä, huolimatta prosessoitavan datan suuresta määrästä. 3D-mallin muokkaamisessa ja tulostukseen valmistelussa suurta osaa esittää myös nykyisten koneiden graafinen kapasiteetti ja siihen liittyvä monitoriteknikka, joiden avulla kolmiulotteisesta kappaleesta voidaan ruudulta reaaliajassa tarkastella hyvinkin aidontuntuista ja korkealaatuaista esitystä. Myös modernit tietoverkot edesauttavat 3D-tulostusta saavuttamaan suuremman osan potentiaalistaan mahdollistamalla digitaalisten tiedostojen nopean siirtämisen niin pienillä kuin suuremmillakin fyysisillä välimatkoilla. (Gibson ym. 2015, 2.0–2.2.)

Itse tulostinlaitteiden hyödyntämissä teknologisissa komponenteissa on myös tapahtunut paljon kehitystä. Nykyaikainen ohjelmoitava logiikka luo esimerkiksi vakaan perustan hyvinkin monimutkaisten mekaanisten osien automatisoimiseen. Niiden avulla tulostimen osia liikuttavia aktuaattoreita pystytään hallitsemaan luotettavasti ja minimaalisilla virhemarginaaleilla. Merkittävänä tekijänä voidaan mainita myös monien tulostusmenetelmien hyödyntämä laserteknologia. Kyseinen on tarkkuutensa vuoksi ideaali 3D-tulostuksen tarpeisiin ja lasereita käytetäänkin sulattamaan ja leikkaamaan sekä tietyillä taajuuksilla suoraan kiinteyttämään materiaalia. Tämän lisäksi toiset prosessit hyödyntävät myös huomattavia kehitysaskelita ottanutta mustesuihkutulostustekniikkaa, jolla pystytään levittämään myös kolmiulotteisen tulostusteknologian käyttämiä materiaaleja. (Gibson ym. 2015, 2.4.0–2.4.3.)

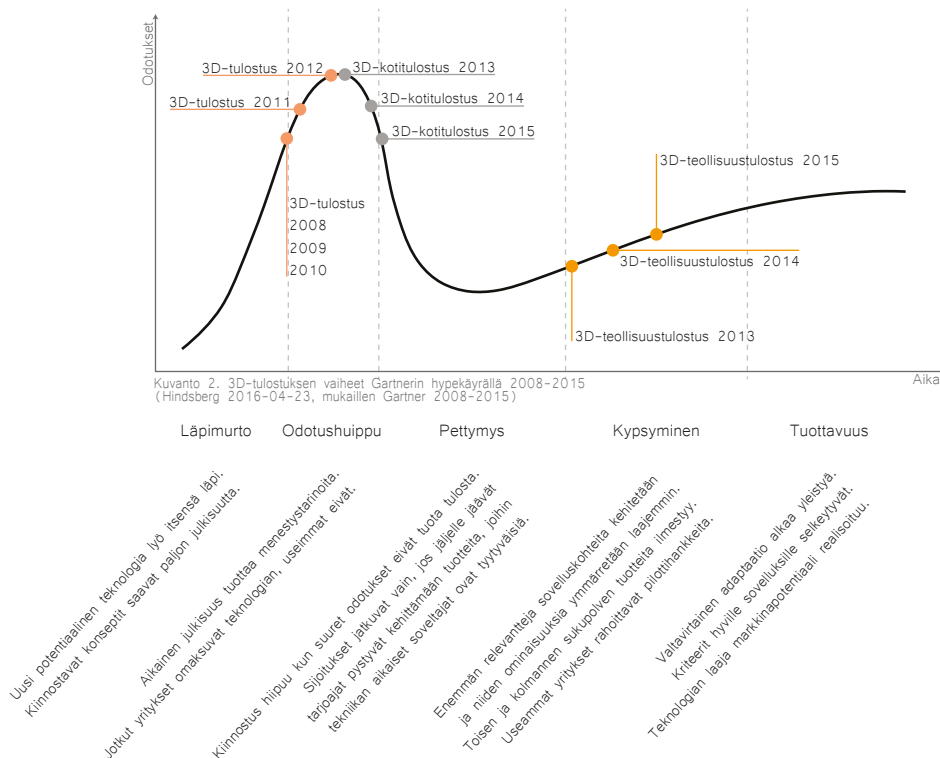
Viime vuosina tapahtuneeseen 3D-teknologian huomattavaan kehitykseen on vaikuttanut myös alan alkutaipaleella myönnettyjen 20-vuotisten patenttien vanheneminen, mikä on vapauttanut kenttää useammille toimijoille ja tätä kautta teknologian kehittäjille (Hoskins 2013, 44). Varsinkin pienempiä yrityksiä, jotka ovat alkaneet soveltaa tekniikoita alemman hintaluokan kotikäyttöönkin tarkoitettujen tulostimien valmistamiseen, on perustettu useita.

2.2.2 Julkisuus

3D-tulostus sisältää paljon sovelluksia, jotka ovat niin sanotusti mediaseksikkäitä. Niissä mainostetaan mahdollisuutta 3D-tulostaa nappia painamalla kaikkea ruuasta taloihin ja uusiin ruumiinosiin menetettyjen tilalle. Tällaista teknologiasta kertovaa journalistiikkaa ei voida lopulta luonnehtia kovinkaan informatiiviseksi sen usein unohtaessa mainita, miten prosessi käytännössä toimii ja kuinka paljon ennakkovalmisteluja se vaatii, puhumattakaan siitä että käsite sulkee sisäänsä monta toisistaan eroavaa tekniikkaa (Hoskins 2013, 6). Tällä ei kuitenkaan niinkään ole merkitystä, sillä uusien teknologioiden saama huomio, hieman harhaanjohtavakin sellainen, luo lisää kiinnostusta kohteen ympärille ja tätä kautta edesauttaa siihen tehtyjä sijoituksia ja siten koko toimialan kehitystä.

3D-tulostus on viime vuodet selkeästi nauttinut niin kutsutusta *hype*-ilmiöstä. Käsite on eräänlainen trendimantra, joka viittaa vaiheeseen, jossa uusi asia tai ilmiö saa paljon positiivista julkisuutta ja sen ympärille syntyy yleisön puolelta paljon innostusta (Boivie 2016). Teknologisessa hypessä uuteen innovaatioon liitetään aina suuria ja usein käytännössä mahdottomiakin odotuksia, ja sen uutisointi keskittyy yleensä niin kutsuttuihin kuriositeetteihin pidemmässä juoksussa pätevien sovelluskohteiden sijasta (Gartner n.d.). Internet on nykyaikana lisännyt kyseisen ilmiön laajuutta huomattavasti täyttyen aiheeseen liittyvistä mielenkiintoisista ja usein humoristisistakin artikkeleista sekä kuva- ja videomateriaalista.

Tietyn teknologian hypeä voidaan kuvata amerikkalaisen Gartner Oy:n, yhden maailman johtavan teknologia-alan tutkimus ja konsultointiyrityksen, kehittämällä hypekäyrällä. Käyrä on viisivaiheinen graafinen kuvanto uusien, nousevien teknologioiden ennustetusta elinkaaresta niiden ensimmäisestä läpimurrosta todelliseen integroitumiseen asti. (Gartner n.d.) Alla olevaan kuvantoon on sijoitettu 3D-tulostuksen vaiheet Gartner Oy:n vuosittain julkaisemalla *Hype Cycle for Emerging Technologies* -käyrällä. Kuvannosta nähdään 3D-kotitulostuksen, johon suurin osa teknologian julkisesta nosteesta on liitettävissä, olevan juuri siirtymässä hypeaallon huipulta kriittiseen vaiheeseen, jossa sen todellista sovellettavuutta aletaan seurata aikaisemman konsepteihin ja mahdollisuuksiin painottuneen julkisuuden sijasta. 3D-tulostus teollisuuden käytössä taas on viime vuosina jatkuvasti vakiinnuttanut asemaansa käytännön tuotantomenetelmänä, ja sen ennustetaan noin 2–3 vuoden sisällä saavuttavan käyrän viimeisen vaiheen, todellisen integroitumisen osaksi alan arkipäiväisiä toimintatapoja.



2.2.3 Maker movement

Teknologisia mullistuksia tapahtuu, kun yksityiset ihmiset pääsevät käsiksi uusiin työkaluihin ja sisällyttävät ne jokapäiväiseen elämäänsä. Se että teknologia on saatavilla kaikkialla, synnyttää vallankumouksia. 3D-tulostus ei ole vielä liittynyt osaksi arkeamme, mutta se on jo ottanut ensiaskeleita ulos teollisuusympäristöstä. Yhteistyössä internetin kanssa toinen tekniikan valtavirralla esittelystä kiitoksen ansaitseva ilmiö on niin kutsuttu *Maker Movement*. Tämä tee-se-itse-pohjainen yhteisö muovaa teknologiaa harrastemielessä samalla tavoin kuin vaikkapa hakkerit ohjelmistoa. Yhteisön jäsenten tekniset sovellukset eivät toki yksilöidy ainoastaan 3D-tulostuksen ympärille vaan levittäytyvät muillekin teknologian osa-alueille. Aikaisina uuden teknologian soveltajina he näyttävät valtavirralla, mikä voisi kyseisen innovaation ansiosta tulevaisuudessa olla mahdollista suuremmassakin mittakaavassa. Kun tämä vielä tapahtuu yksityisten harrastelijoiden toimesta luovuuden ja kokeilun ilmapiirissä, saadaan huomattavasti kirjavampi ja innovatiivisempi joukko tuloksia kuin teollisuusympäristössä tehokkuuden ja tuottavuuden maksimoinnin kahleissa. (Lipson & Kurman 2013, 4.1.1.)

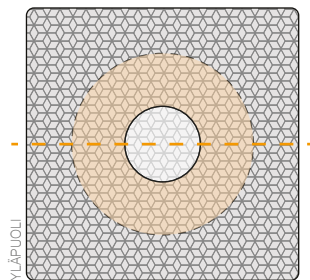
3 3D-TULOSTUKSEN MAHDOLLISUUDET

KULTAINEN KESKITIE

3D-tulostus on yksinkertaisesti sanottuna uudenlainen tapa valmistaa asioita. Se sijoittuu positiivisten ja negatiivisten ominaisuuksiensa kanssa aivan uudelle sektorille käsityöläisyyden ja koneellisen massatuotannon välillä, lainaten piirteitä molemmilta. Laitteet eivät kuitenkaan leikkaa tai muovaa asioita muotoonsa kuten artesaanit tai perinteiset valmistuskoneet; Niiden kerroksittainen valmistusprosessi mahdollistaa huomattavasti aikaisempaa suuremman digitaalisten konseptien kirjon realisoimisen fyysisiksi kappaleiksi. Juuri tämä ominaisuus tekee tulostimista myös huomattavasti monipuolisempia kuin mikään muu valmistusmuoto — oli se sitten ihminen tai kone. (Lipson & Kurman 2013, 2.0–2.1, 3.1.)

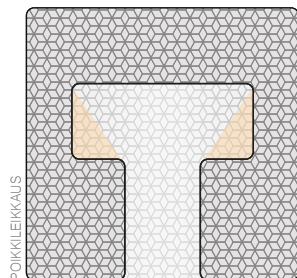
3.1 MUODON VAPAAUS

Designerin näkökulmasta 3D-tulostuksen suurin uutuusarvo on ehdottomasti, että se vapauttaa muotoilun perinteisten valmistusmenetelmien kahleista. Se mahdollistaa monien sellaisten muotojen valmistamisen, jotka on aikaisemmin pitänyt koota useasta erillisestä osasta tai jotka ovat olleet jopa kokonaan poissuljettuja. Tällaisiin lukeutuvat esimerkiksi kappaleet, jotka sisältävät negatiivisia pintoja, toisiinsa lukkiutuvia ja lomittaisia osia, sisäisiä keventäviä rakenteita tai monimutkaisia orgaanisia pintoja. (Lipson & Kurman 2013, 2.0–2.1; Gibson ym. 2015, 3.7.3–3.7.6.)



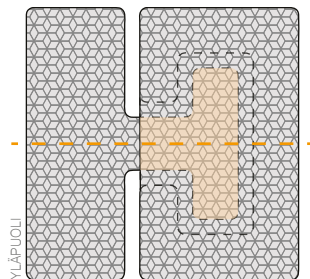
Negatiiviset pinnat

Ensimmäinen huomattava etu 3D-tulostuksessa valmistusmenetelmänä, verrattaessa sitä koneellisesti tai käsin tuotettuihin kappaleisiin, on sen mahdollisuus negatiivisiin pintarakenteisiin (merkitty oranssilla kuvantoon 3) (Gibson ym. 2015, 1.6.3). Tällaisiksi nimitetään kappaleen osia, joihin ei suoralla työkalulla, kuten jyrsimen terällä, ole pääsyä mistään mahdollisesta tulokulmasta.



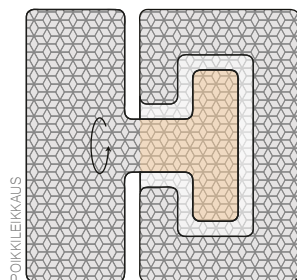
Kuvanto 3. Negatiiviset pinnat
(Hindsberg 2016-04-24)

Kyiseiselle ominaisuudelle perustuvat pohjimmiltaan kaikki jälkeempään kuvatut uudet tuotannolliset mahdollisuudet.

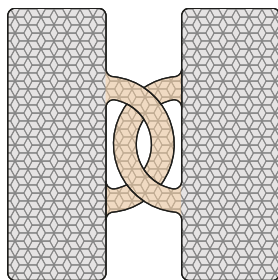


Lomittaiset ja toisiinsa lukkiutuneet osat

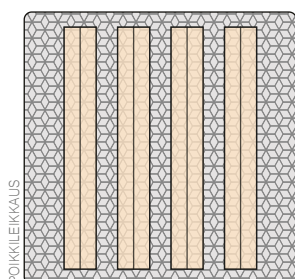
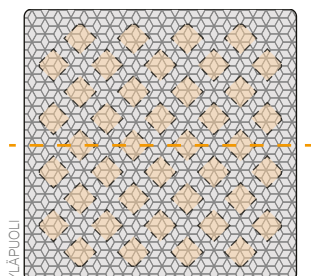
Kappaleen kerroksittainen rakennusprosessi antaa mahdollisuuden myös sisäkkäisten osien valmistamiseen. Rakenteet, jotka on ennen pystytty tuottamaan ainoastaan monesta yksinkertaisesta osasta kokoamalla, voidaan 3D-tulostaa yhtenä monimutkaisempana, valmiiksi koossa olevana rakenteena. Tämä mahdollistaa myös useiden lomittaisten, toisiinsa nähden liikkuvienkin osien kokonaisuuden tuottamisen yhdellä kertaa (kuvanto 4). (Gibson ym. 2015, 3.7.6.)



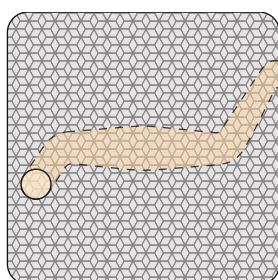
Kuvanto 4. Lomittaiset osat
(Hindsberg 2016-04-24)



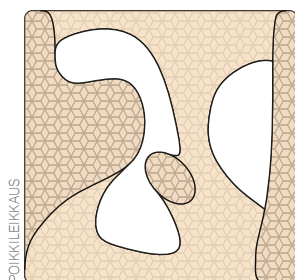
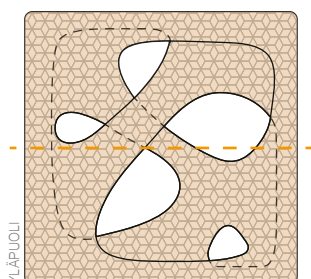
Kuvanto 5. Toisiinsa lukkiutuneet osat
(Hindsberg 2016-04-24)



Kuvanto 6. Sisäiset rakenteet 1
(Hindsberg 2016-04-24)



Kuvanto 7. Sisäiset rakenteet 2
(Hindsberg 2016-04-24)



Kuvanto 8. Organiset kappaleet
(Hindsberg 2016-04-24)

Samalla tavoin pystytään myös tulostamaan toisiinsa lukkiutuneita rakenteita kuten esimerkiksi valmiita lenkityksiä (kuvanto 5).

Optimoidut sisäiset rakenteet

Perinteisillä tekniikoilla valmistetut kappaleet sisältävät usein valmiille tuotteelle turhaa materiaalia, johtuen lähinnä tuotantokaarensa vaatimuksista ja rajoitteista. Esimerkiksi valaessa materiaalin juoksun varmistaminen, kokoamisvaiheen helpottaminen tai kappaleen yksinkertaistus koneistettavaksi voivat kaikki aiheuttaa lopulliseen kappaleeseen ylimääräistä raaka-ainemassaa. (Caffrey & Wohlers 2015, 187.)

3D-tulostamalla kappaleisiin voidaan luoda sisäisiä keventäviä ristikko-, solu- ja verkkorakenteita (kuvanto 6). Tuotteen ulkomuoto voidaan säilyttää prosessissa identtisenä ja näin sen toiminnalliset, ergonomiset ja esteettiset ominaisuudet pysyvät muuttumattomina. Sisäinen koostumus voidaan kuitenkin rakentaa muotoon, joka on huomattavasti kiinteää ainetta kevyempi. Kyseiselle rakenteelle voidaan tehdä alueelliseen rasitukseen perustuvaa tehostusta, ulottuen vähäkuormitteisten alueiden seinäpaksuuden ohentamisesta aina systemaattiseen topologiseen optimointiin asti. (Gibson ym. 2015, 17.7.2–17.7.3.)

Samalla tavoin tulostettuihin kappaleisiin voidaan luoda sisäisiä kanavia, jotka on optimoitu kaasujen ja nesteiden juoksulle (kuvanto 7). Perinteistä kautta tuotettuna tällaisia sisältävät kappaleet on valmistettu täysin koneistuksen tai kokoamisprosessinsa ehdoilla, jolloin sisäisten rakenteiden muodoille on hyvin vähän variaatiomahdollisuuksia ja niiden toiminnallisuudelle jää paljon parantamisen varaa. (Caffrey & Wohlers 2015, 188–189.)

Monimutkaiset orgaaniset kappaleet

Saatavilla olevat työkalut ovat perinteisesti määrittäneet, millaisia muotoja pystytään valmistamaan. Esimerkiksi CNC-jyrsin kykenee muodostamaan pintoja ainoastaan teränsä mittasuhteiden ja akseliensa määrittämien mahdollisten tulokulmien puitteissa ja muotin kautta valmistettavien kappaleiden tulee sisältää tarvittavat päästöt. (Lipson & Kurman 2013, 2.2.)

3D-tulostus luo valmistustekniikkana paljon uusia mahdollisuuksia poistaen totuttuja rajoitteita. Ehkä mielenkiintoisimpina näistä vielä hyvin tutkimattomista poluista, avautuu potentiaali tuottaa ennen vain luonnossa mahdollisia monimutkaisia orgaanisia muotoja (kuvanto 8). (Lipson & Kurman 2013, 2.2.)

3.2 TUOTANNOLLISET EDUT

3D-tulostus voi auttaa käyttäjiään ammattialasta ja asiantuntijuuden tasosta riippumatta ylittämänsä monia ratkaisevia kustannuksiin, ajankäyttöön ja monimutkaisiin kappaleisiin liittyviä tuotannollisia esteitä.

Jos verrataan muotoilijan näkökulmasta laajemmin perinteisen massatuotannon kautta ja 3D-tulostamalla valmistettua tuotetta, on prosessista löydettävissä paljon muitakin etuja kuin monipuolisempi muotojen mahdollisuus. Massatuotanto, tuo nykyisen tuotantotaloutemme selkäranka, on pohjimmiltaan itse valmistettavalle objektille hyvin armoton prosessi. Tuotekonseptin muuttaminen tuottavaksi sarjavalmisteiseksi kappaleeksi sisältää paljon uhrauksia, ja on suuremmissa kuvassa koko yrityksenkin kannalta täynnä sekä piilotettuja kuluja että viivästyksiä. Massatuotannon kannattavuus perustuu niin kutsuttuihin suurtuotannon etuihin (engl. *Economies of Scale*) eli siihen, että mitä suuremmat tuotantomäärät sarjavalmisteisella kappaleella on, sitä pienemmäksi sen yksikkökustannukset laskevat. Näin tapahtuu, kun suuret yritykset tekevät huomattavan etukäteissijoituksen yksittäisen tuotteen suunnitteluun ja tuotantokaaren työkalujen teettämiseen. (Lipson & Kurman 2013, 3.0) Tietyn artikkelin valmistuskustannukset koostuvat siis tuotannossa syntyneistä välittömistä menoista, kuten esimerkiksi raaka-ainekulut ja kokoonpanohenkilöstön palkka, sekä sen valmistamisen mahdollistaneista alkusijoituksista. Jälkimmäisten osuus per tuote laskee kumulatiivisesti tuotantomäärän lisääntyessä ja näin tuotteen kokonaiskustannukset pienenevät. Itse tuotteen suunnittelulle ja elinkaarelle tämä aiheuttaa kuitenkin monia negatiivisia vaikutuksia.

Sarjavalmistukseen tähtäävän tuotekehityksen kompromissit alkavat jo suunnittelupöydältä, jossa muotoilijan pääsisäinen ajatusprosessi on yleensä koulutettu oman alansa tuotannon rajoitteisiin. Sen lisäksi että kappaleen tulee olla valmistettavissa tietynlaisen koneistuksen ja mahdollisen kokoamislinjaston kautta tehtaan joko konkreettisella tai kuvainnollisella liukuhihnalla, sen pitää myös vastata markkinoilla mahdollisimman suureen kysyntään. Koska perinteinen massatuotanto ei pysty vastaamaan kustomaation ja pienten asiakasryhmien tarpeisiin, suunnitellaan tätä kautta valmistettavista tuotteista mahdollisimman geneerisiä ja valtavirran mieltymysten mukaisia. Päästäkseen tähän tavoitteeseen yritys joutuu usein uudenlaista tuotetta kehittäessään käyttämään huomattavan summan selvittääkseen, millainen edellä mainitun artikkelin tulisi käytännössä olla. Koska jokaisen variaation testaus ja taustaselvitys syö budjettia puhumattakaan kustannuksista, jotka aiheutuisivat enemmän kuin yhden mallin viemisestä tuotantoon asti, syntyy uusien ideoiden ja valmiin tuotteen välille huomattava innovaatiokitka. Tämä estää monia pieniä, potentiaalisesti todella hyviäkin ideoita koskaan pääsemästä edes testaukseen asti ja rajoittaa näin suunnittelijan luovia mahdollisuuksia merkittävästi. (Lipson & Kurman 2013, 3.0–3.1, 4.3.)

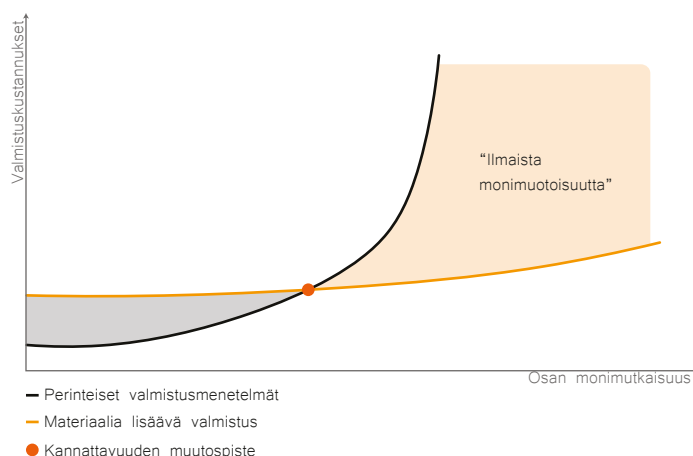
Menestyksekkään tuotteen kehitettyäänkin yritys alkaa tehdä voittoa vasta huomattavan myyntimäärän jälkeen, ansaittuaan ensin takaisin tuotekehitysprosessiin ja valmistuksen mahdollistamiseen tekemänsä etukäteissijoitukset. Tämä tarkoittaa myös, että sen kannalta on kannattavaa pitää tuote mahdollisimman pitkään muuttumattomana, koska pienenkin variaation tekeminen johtaisi lähes poikkeuksetta edellä kuvatun kalliin ja aikaavievän prosessin alkamiseen alusta. Suuren kokoluokan massatuotannon ei voida siis sanoa olevan luonteeltaan kovinkaan joustavaa. Tämän asteisella valmistuksella ei ole mahdollisuutta vastata markkinamuutoksiin kovinkaan lyhyellä aikajänteellä, ainakaan tavalla jota voitaisiin kuvata yritykselle suhteellisen riskittömäksi. (Lipson & Kurman 2013, 3.0, 4.3.)

Luonnollisesti myös tuotantotalouden yleinen pyrkimys mahdollisimman mataliin valmistuskustannuksiin verottaa osansa lopputuotteen laadusta. Suurissa tuotantomäärissä esimerkiksi materiaalivalinnoilla on huomattava vaikutus tietyn artikkelin tuottamaan kokonaisvoittoon yritykselle. Vaikka ero olisikin yksittäisen kappaleen kohdalla pieni, sen kertautuessa vähintään tuhatluvuilla erotuksesta tulee jo merkittävä. Samaan tapaan myös vaikkapa pienen laatua parantavan viimeistelyaskeleen lisääminen artikkelin tuotantokaareen, oli se sitten kertasuoritteena miten pieni toiminto tahansa, voi tarkoittaa massatuotantoon skaalattaessa jopa tarvetta palkata ja kouluttaa useampi uusi työntekijä. Kannattavan massatuotannon vaatima tuotekehitysprosessi pakottaa siis muotoilijan tekemään kompromisseja tuotekonseptinsa kaikilla osa-alueilla ja alkuperäinen visio voi näin prosessin aikana kadota hyvinkin kauas taka-alalle. (Lipson & Kurman 2013, 2.2, 3.0.)

Pienten sarjojen käsityönä tuottaminen verottaa itse tuotekonseptia huomattavasti teollista massatuotantoa vähemmän, mutta nostaa taas tuotteen hintaa tuntuvasti. Artesaani pystyy vastaamaan yksittäisenkin asiakkaan toiveisiin ja kustomaatiopyyntöihin, ja hänen työskentelynsä on paljon joustavampaa ja voi kehittyä nopeaakin tahtia markkinatilanteen muutosten mukana. Hän ei myöskään tarvitse suurta etukäteissijoitusta aloittaakseen uuden tuotteen valmistuksen ja voi tehdä luovia kokeiluja paljon vapaammin ja pienemmällä riskillä. Käsityönä toimiva tuotanto ei kuitenkaan skaalaudu lähellekään massatuotannon kappalelukemia, joten artesaani ei pysty täyttämään tuotteen mahdollista laajempaa kysyntää rajallisen valmistuskapasiteettinsa takia. Ihanteellinen tilanne olisikin, jos pienten sarjojen massatuotanto ei olisi oksymoroni. (Lipson & Kurman 2013, 3.0.)

3D-tulostus luo kahden edellä esitetyn ääripään välille mielenkiintoisen keskitien yhdistäen digitaalisen tarkkuuden ja toistettavuuden käsityön tuomaan muotoilulliseen vapauteen ja tuotannon joustavuuteen. Tulostettaessa ei ole eroa ovatko tuotettavat kappaleet kopioita toisistaan, kukin jonkinlaisella yksityiskohdalla personoituja tai täysin erilaisia. Tässä suhteessa tulostin on verrattavissa artesaaniin, joka kykenee tuottamaan lukemattomia erilaisia ja joka kerta toisistaan eroavia muotoja. Pohjimmiltaan 3D-tulostaminen on kuitenkin teollista tuotantoa valmistaen kappaleita ennustettavan, toistettavan ja systemaattisen prosessin mukaan. Tämä mahdollistaa esineiden sarjatuotannon, kuitenkin rajoittamatta niiden mahdollisuuksia perinteisen tehdastuotannon tapaan, jossa personointi on joko kallista tai mahdotonta ja uuden muodon tuotantoon ottaminen vaatii edellä kuvatusti paljon pääomaa ja aikaa. 3D-tulostin tarvitsee samaan vain uuden mallitiedoston ja valmistamiseen kuluvan määrän raaka-ainetta. (Lipson & Kurman 2013, 2.2, 3.1–3.2.)

Perinteisesti tuotettuna, oli kyse sitten koneistetusta tai käsityöstä, mitä monimutkaisempi kappaleen muoto on, ja mitä enemmän yksityiskohtia se sisältää, sitä kalliimpi se on valmistaa. Tämä ei päde 3D-tulostukseen, vaan hyvinkin koristeinen ja näyttävä muoto on toteutettavissa ajaltaan ja kustannuksiltaan lähes identtisesti samankokoiseen yksinkertaiseen kuutioon verrattuna. (Lipson & Kurman 2013, 2.2.) Tätä suhdetta on kuvattu verraten perinteisen valmistuksen vastaavaan kuvannossa 9, jossa tietyn pisteen jälkeen näidän kahden tekijän näkökulmasta tapahtuu kannattavan valmistustavan muutos. Kohdan jälkeen perinteisten valmistustapojen huomattavasti kohoavien kustannusten ja 3D-tulostuksen välille syntyvän aukon sanotaankin usein sisältävän niin sanotusti ilmaista monimuotoisuutta. (Boivie 2016.)



Kuvanto 9. Osan monimutkaisuuden kustannukset (Hindsberg 2016-05-07, mukaillen Boivie 2016)

3.3 VIHREÄ NÄKÖKULMA

Monet edellä esitellyistä 3D-tulostuksen eduista tekevät siitä myös ekologisemman vaihtoehdon perinteisille valmistusmetodeille. Alkaen tuotantotavan tuomasta muotoilullisten rajoitteiden poistumisesta, joka avaa mahdollisuuden käyttötarkoitukseensa ja -ympäristöönsä aiempaa huomattavasti paremmin optimoiduille tuotteille. Älykkäästi suunnitellut osat voidaan valmistaa vähemmästä raaka-aineesta, joskus jopa edeltäjänsä paremmilla ominaisuuksilla ja niiden käyttöikä on yleensä pidempi. Valmistusmenetelmille ominaisella raaka-aineen lisäämisellä vain tarvittaviin kohtiin rakennettavaa kappaletta, tämä tapahtuu myös huomattavasti pienemmällä hukkamateriaalimäärällä. (Lipson & Kurman 2013, 11.2; Caffrey & Wohlers 2015, 186–189.)

Tuotantoketju voi lyhentyä huomattavasti monien osien muuttuessa yhdeksi, joka myös myöhemmin pienentää varastoinen tarvetta. Lisäksi inventaarion luonne muuttuu, koska kappaleita on mahdollista säilyttää digitaalisessa muodossa fyysisen sijaan ja valmistaa niin kutsutulla on-demand-periaatteella. Virtuaaliset tuotteet voivat myös osaltaan lyhentää massatuotettujen kappaleiden huomattavan saastuttavaa toimitusketjua. 3D-tulostustekniikoilla on potentiaali paikallistaa hyödykkeiden valmistusta niiden ollessa laitteen kokoon nähden tuotantokapasiteetiltaan verrattain suuria. Tämän lisäksi yhden laitteen monipuolisuus ja kyky valmistaa kannattavasti pieniä sarjoja tai jopa yksittäisiä kappaleita tuo mukanaan paljon uusia mahdollisuuksia pienemmän kokoluokan tuotantolaitosten perustamiselle lokaalisti. 3D-tulostukselle on myös kehitetty paljon tekniikoille uniikkeja ekologisia materiaaleja ja tulevaisuudessa monimateriaalisen valmistuksen kehittyessä voidaan kappaleita optimoida käyttötarkoitukseensa vielä nykyistäkin paremmin. (Lipson & Kurman 2013, 2.2–3.1, 11.2–11.3; Caffrey & Wohlers 2015, 186.)

3.4 OIKEA LÄHESTYMISTAPA

3D-tulostus ei kaikkien edellä kuvattujen positiivisten ominaisuuksiensa kanssa ole kannattavin ratkaisu kaikenlaiseen teolliseen valmistukseen. Avainasemassa onkin oikeiden ongelmien paikantaminen, joiden ratkaisemisessa kyseisen teknologian etuja voitaisiin optimaalisesti hyödyntää. Tämä tapahtuu aina kontekstissa ympärillä olevaan muuhun teknologiaan ja sen hinta-laatusuhteeseen. Verrattaessa perinteisiin valmistustekniikoihin 3D-tulostuksen potentiaali tulee parhaiten esille innovaation siirtämisessä uusiin, ennen mahdolltomiin tai valmistuskuluiltaan epäkannattaviin tuotteisiin ja sen mahdollistamien designratkaisujen (kuten kohdassa 3.1 esitellyt) soveltamiseen olemassa oleviin standardiosiin. (Boivie 2016.)

3D-tulostus ei todennäköisesti ainakaan lähivuosina muodosta laajaa uhkaa perinteiselle koneistukselle, vaan sen voidaan oikeastaan todeta lisäävän kyseisen arvoa. Perinteinen koneellinen tuotanto on edelleen ainoa tapa tuottaa esimerkiksi täystiheitä metallikappaleita, joille pinnanlaatu ja mittatarkkuus ovat kynnyskysymyksiä. Kutakin prosessia kannattaa siis hyödyntää, kun se palvelee lopputuloksen tarkoitusta parhaiten. Viereisen sivun kuvannossa 9 on esimerkiksi esitelty punaisena kannattavuuden muutospiirteenä kohta, jossa monimutkaisuuden ja kulujen korrelaation kannalta kannattaa siirtyä perinteisistä valmistustekniikoista materiaalia lisääviin. 3D-tulostus ja koneistus voivat monessa kohtaa myös komplementoida toisiaan. (Boivie 2016.) Näiden yhdistelmällä voidaan esimerkiksi luoda kappaleita, jotka ensin mainitulla rakennetaan sisältämään monimutkaisia sisärakenteita ja jäljellä poistetaan pintaan syntynyt epätasainen struktuuri ja porataan esimerkiksi tietynlaisia kierteitä vaativia reikiä.

Ennen kaikkea 3D-tulostus luo tarpeen ajatella uudella, erilaisella tavalla. Valmistustekniikan potentiaalin täyttämiseksi suunnittelijoiden ja valmistajien pitää valjastaa sen mahdollisuudet siitä oikeasti hyötyviin sovelluskohteisiin ja ideoihin. Varsinkin suurten yritysten kohdalla totuttuja käytäntöjä muutetaan kankeasti ja uusien tuotantotapojen pitää olla huomattavasti kannattavampia, nopeuttaa yrityksen reagointikykyä ja parantaa tuotteiden toiminnallisuutta ennen kuin niihin siirrytään (Caffrey & Wohlers 2015, 186). 3D-tulostuksella pystytään potentiaalisesti kaikkeen edellä lueteltuun, kunhan sen mahdollisuudet kohdennetaan oikein; Yksinkertaiset, suurissa volyymeissa valmistetut tuotteet eivät esimerkiksi ole tarkoituksenmukainen kohde tekniikalle, mutta orgaanisiin ja monimutkaisiin muotoihin se voi usein olla ainoakin tuotantotapavaihtoehto.

4 CAD to CAM

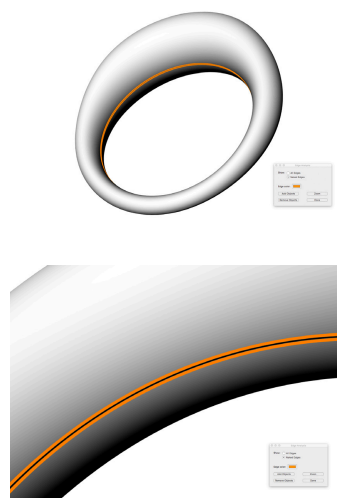
Materiaalia lisäävän valmistuksen pohjana toimii virtuaalinen 3D-tiedosto, jonka luomiseen ja prosessiin sopivaan muotoon muokkaamiseen kuuluu huomattava määrä työtä. Tiedoston täytyy toimia saumattomasti yhteen valmistuksen suorittavan laitteen käyttöjärjestelmän kanssa, joka kertoo sen fyysisille komponenteille mihin lisätä raaka-ainetta. Viimeistellynkään 3D-tiedoston valmistelemisen AM-tekniikalla tuotettavaksi ei välttämättä ole yksioikoinen prosessi, puhumattakaan itse halutunlaisen tiedoston luomisesta.

4.1 TIETOKONEAVUSTEINEN SUUNNITTELU, engl. Computer-aided Design (CAD)

Tietokoneavusteinen suunnittelu toimii nykypäivänä pohjana lähes kaikille ympärillämme oleville tuotteille ja CAD-ohjelmistoja onkin kehitetty moniin erilaisiin käyttötarkoituksiin. Pääasiallisesti insinöörien käytössä olevat tilavuusmallinnus-ohjelmat (engl. *Solid Modeling*) luovat koneistuksen hyödyntämiä verrattain yksinkertaisia kappaleita valmiin primitiivikirjaston pohjalta. Näissä ohjelman käyttöliittymästä löytyviä geometrisiä perusmuotoja yhdistellään ja esimerkiksi leikellään toisistaan. Kyseiset ovat muotoilun käyttöön hyvin kankeita, joten tuotekehityksen tarkoituksiin onkin syntynyt oma ohjelmistoluokka, joka yleensä yhdistää edellä esitetyn erilaisiin pinnanluontiteknikoihin. Tämä pintamallinnukseksi (engl. *Surface Modeling*) nimitetty työskentelytapa on edellistä huomattavasti joustavampi ja pystyy luomaan paljon monimuotoisempia kappaleita. Pintamuodot rakennetaan tässä yleensä digitaalisesti piirrettyjen, niitä rajaavien kurvien pohjalta, esimerkiksi pyyhkäisemällä niitä toisiaan pitkin. Lisäksi muunnoksena edellisestä on lähinnä animaatio- ja pelialan käytössä olevia ohjelmistoja, joissa kappaleita niin sanotusti digitaalisesti veistetään (engl. *Sculpting*). Näiden soveltaminen tuotemuotoiluun on kuitenkin usein ongelmallista, koska niillä luotujen kappaleiden tarkkoja mittasuhteita on vaikea hallita.

Koska materiaalia lisäävä valmistus tuottaa kiinteitä kappaleita rakentamalla prosessissa myös niiden sisäosan, täytyy pohjana olevalla tiedostolla olla suljettu tilavuus. Tämä erotuksena esimerkiksi CNC-jyrsintään, jossa laitteen työstöväline on kosketuksissa vain kappaleen pintaan. Tällöin ei aukoista sen kuoressa, joihin terä ei mahdu tai määritettyjen tulokulmiensa puitteissa pääse, ole haittaa. (Gibson ym. 2015, 2.3.) Edellä mainittu suljettu, niin sanotusti vesitiivis kappale syntyy, kun jokaisella pinnalla olevista ulko- ja sisäpuolista vain ensin mainittu on näkyvissä (Tedeschi 2014, 320). Näin AM-laitteen käyttöliittymä ymmärtää pinnan sisään täysin rajautuvan tilavuuden kiinteäksi aineeksi ja pystyy luomaan sen rakentamista varten tarvittavat ohjeet laitteelle. CAD-ohjelmat osaavat kertoa, onko kappale edellä esitetysti kiinteä, toisin sanoen solidi, ja ne sisältävät myös yleensä työkaluja, jotka kertovat mistä kappale mahdollisesti niin sanotusti vuotaa. (Gibson ym. 2015, 15.2.2.) Esimerkiksi koruteollisuuden laajalti hyödyntämässä Robert McNeel & Associatesin Rhinoceros® 5.0 -ohjelmistossa tämä tapahtuu kuvannossa 10 esitellyllä käskyllä *ShowEdges*, joka korostaa värillisinä avoimet reunat, jotka ohjelmassa kulkevat nimellä *naked edges*.

Tämän lisäksi 3D-malli ei saa sisältää moninkertaisia reunoja, edellä mainitussa ohjelmassa *non-manifold edges*, joissa yhden reunan samaan kohtaan liittyy enemmän kuin yksi toinen reuna. Tällaisia syntyy esimerkiksi kappaleen sisälle jääneistä välitasoista, jotka haittaavat valmistusprosessia. Malli ei myöskään saisi käsittää toisistaan erillisiä, risteäviä kappaleita, joita ei ole yhdistetty yhtenäiseksi pinnaksi. Mallintaessa on hyvä ottaa huomioon myös käytettävän AM-laitteen resoluutio ja valmistajan suosittelemat vähimmäisainevahvuudet. (Tedeschi 2014, 320–322.)



Kuvanto 10. Naked edges (Hindsberg 2016-05-07)

CAD on huomattavasti lisännyt suunnittelun joustavuutta ja mahdollisuuksia, mutta samassa voidaan sen todeta olevan materiaalia lisäävän valmistuksen yhteydessä myös prosessia rajoittava tekijä. Koska tämän päivän ohjelmistoja ei ole rakennettu AM-tekniikan tarkoituksiin, on niillä vaikea hallita esimerkiksi kappaleiden sisäisiä rakenteita, jotka kyseinen valmistusteknologia kuitenkin olisi valmis vaivatta tuottamaan (Lipson & Kurman 2013, 6.2.4).

4.1.1 Algoritmiavusteinen suunnittelu, engl. Algorithm-aided design (AAD)

Luonto mielletään usein sattumanvaraiseksi ja ennustamattomaksi, ja seurauksena tästä sen ja teknologian katsotaan monesti olevan saman janan eri ääripäitä. Orgaanisia, määritelmällisesti eloperäisiä ja luonnonmukaisia muotoja harvoinkaan liitetään tietokoneavusteiseen suunnitteluun ja niitä onkin verrattain vaikea luoda perinteisillä tuotantoalan CAD-ohjelmistoilla. (Shiskov 2016.) Tällaiseksi kuvatut kappaleet ovat myös itse designerille haastavia, osittain koska niiden tarkoituksellinen suunnittelu on jo itsessään paradoksaalista. Mahdollisimman yksinkertaisten ja vaivattomimman oloisten muotojen eteen joudutaankin useasti tekemään eniten töitä, puhumattakaan monimutkaisten, luontoa jäljittelevien virtaviivaisten ja tasapainoisten kokonaisuuksien luomisesta. Suunnittelun lisäksi orgaanisten muotojen valmistus on aina ollut haaste. Koska määritelmänsä mukaan kappale pitäisi saada suunnitella ilman muodollisia rajoituksia, on hyvin epätarkoituksenmukaista alkaa muotoilemaan sitä juuri tuotantokaarensa ehdoilla. Materiaalia lisäävä valmistus tuo ehdottomasti ratkaisun tähän ongelmaan ja sen myötä voidaan keskittyä siihen, miten itse muotoilun rajoitteita voitaisiin poistaa.

Vaikka järjestelmällinen, tarkkaan määritelty designtyöskentely ja orgaaninen, luonnollisen tuntuinen lopputulos voivat vaikuttaa irrallisilta toisistaan, ei asia lähemmin tarkasteltuna ole näin mustavalkoinen. Luonto ja sen muodostamat orgaaniset muodot toimivat iteratiivisesti. Jokainen elävä organismi seuraa relatiivisen pientä joukkoa sääntöjä, joiden pohjalta ne kertaautuvasti kehittyvät suhteessa ympäristöönsä ja sen rajattuihin resursseihin. Näin monista objekteista onkin löydettävissä säännönmukaisia mittasuhteita, jotka jäljittyvät matemaattisiin kaavoihin. Tietokoneiden laskentatehon lisääntyessä tutkijat ovatkin todenneet, että tehokkain tapa imitoida luonnon pohjimmiltaan hyvinkin älyllistä luomisprosessia on soveltaa muotojen generoimiseen matemaattisesti määriteltyjä sääntöjä, algoritmeja. (Lipson & Kurman 2013, 10.1.)

Algoritmi on sarja yksiselitteisesti määriteltyjä käskyjä, ohjeita tai toimenpiteitä tietyn tehtävän suorittamiseksi. Sen voidaan myös sanoa palauttavan vastauksen kysymykseen, tai suorittavan tietyn toiminnon äärellisen, täsmällisesti spesifioidun ohjelman perusteella. Prosessissa toimi on alla olevan kuvannon 11 esittämällä tavalla jaettu joukoksi yksinkertaisia vaiheita, joita on helppo käsitellä esimerkiksi tietokoneellisesti. Kyseinen funktio on siis riippuvainen sille määritellyistä käskyistä ja näitä ohjaavista muuttujista eli parametreista. Se olettaa toimiakseen syötteeksi käskyjensä tarvitseman määrän mainittuja muuttujia, joiden pohjalta se pystyy generoimaan joukon ennalta määritettyjen reunaehtojensa sisään sopivia tuloksia. (Tedeschi 2014, 22–26.)

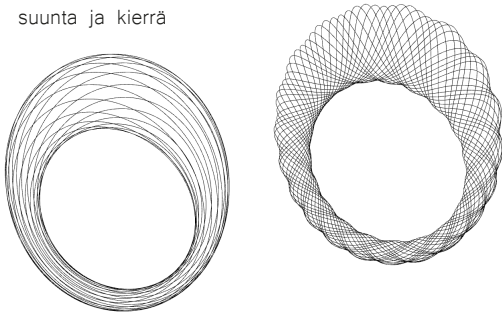


Kuvanto 11. Algoritmi (Hindsberg 2016-05-07, mukailen Tedeschi 2014, 23)

Algoritmeilla voidaan tuottaa myös geometrioita, ja niitä onkin alettu huomattavissa määrin hyödyntää tietokoneavusteisen suunnittelun lisäpotentiaalina. Lähes kaikkiin laajasti teollisuuden käytössä oleviin CAD-ohjelmiin onkin nykypäivänä integroitu editoreja, joiden avulla niiden primitiivejä on mahdollista hallita ja luoda luonteeltaan kyseisen ympäristön normaalista poikkeavan prosessin kautta. Kun perinteinen digitaalinen mallinnus perustuu objektin suoraan virtuaaliseen manipulointiin näennäisfyysisesti hiiren ja näppäimistön avulla, tapahtuu sama algoritmien kautta määrittelemällä toimenpiteitä, ilmaistuna yleensä ohjelmointikielellä. Algoritmiavusteisen suunnittelun voidaan siis pohjimmiltaan sanoa olevan ohjelmointia. Koska koodin kirjoittaminen ei kuitenkaan vielä nykypäivänä monelle designerille ole kovinkaan lähestyttävä työskentelytapa, on edellä mainituista editoreista saatavilla myös muutamia graafisia versioita, joissa koodaaminen tapahtuu visuaalisessa muodossa digitaalisia rakennuspalikoita toisiinsa ketjuttamalla. Näihin toimintoelementteihin taas yhdistetään säädettäviä parametreja, joita muokkaamalla algoritmi tuottaa aina erilaisen lopputuloksen, tässä tapauksessa tietynmuotoisen digitaalisen kappaleen. (Tedeschi 2014, 24–30.) Edellä kuvattu on havainnollistettu seuraavalla aukeamalla kuvannossa 12, joka on koostettu kuvankaappauksista Rhinoceros® 5.0 CAD-ohjelmistosta ja sen lisäosana toimivasta graafisesta algoritmieditorista Grasshopper®:sta.

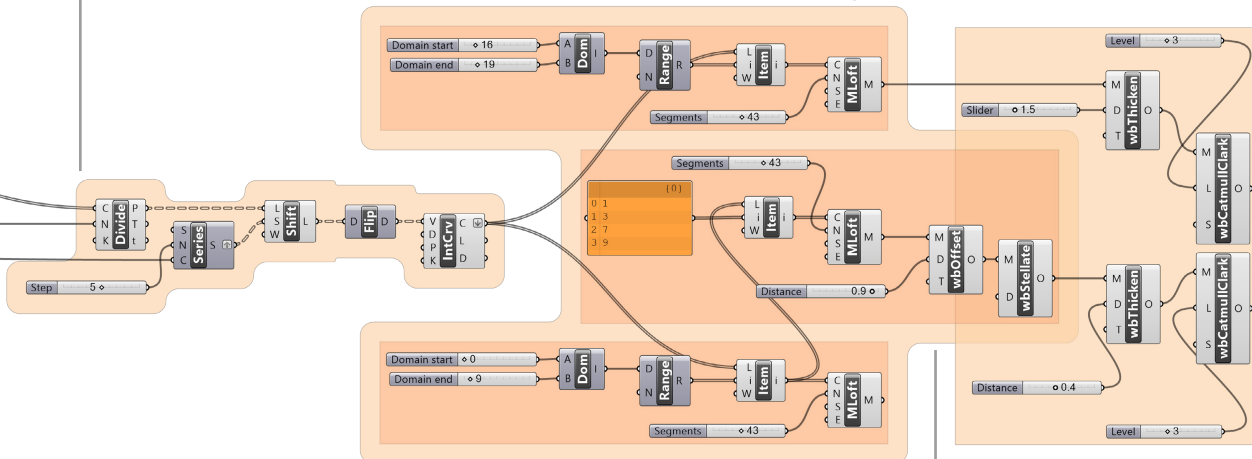
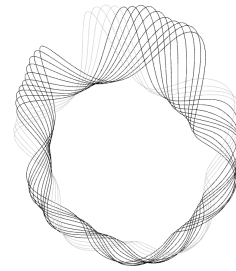
03.

Käännä profiilikurvien
suunta ja kierrä



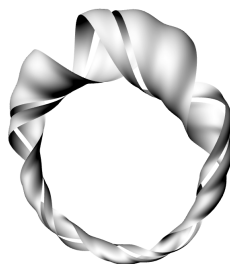
04.

Valitse hyödynnettävät
kurvit



05.

Luo pinta
profiilikurvien välille



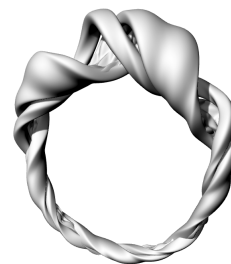
06.

Kuvioi sisäpinta



07.

Paksunna, siloita ja muuntele



4.1.2 STL

Kun käypä kolmiulotteinen malli kappaleesta on valmis, pitää se konvertoida sellaiseen muotoon, jonka kanssa AM-laitteen käyttöliittymän on mahdollista työskennellä. Mahdolliset tiedostomuodot vaihtelevat ohjelmittain, mutta alan alkutaipaleesta asti epävirallisena standardina on pidetty STL-muotoa. Lyhenne tulee sanasta Stereolithografia, joka on ensimmäinen vuosikymmeniä sitten kehitetty lisäävän valmistuksen menetelmä, joka nykyään luokitellaan allasvalopolymeerisaatiotekniikaksi. Myöhemmin kirjainyhdistelmälle on kehitetty laaja-alaisempia merkityksiä, joista kuvaavin on Standard Tessellation language. (Lipson & Kurman 2013, 6.3.1.) Termi voidaan kääntää tarkoittamaan muotoa, jossa kappaleen pinta on määritelty tesselaatiolla, eli mosaikkimaisesti peitetty yhdellä geometrisellä kuviolla ilman aukkoja tai päällekkäisyyksiä. STL-formaatissa tämä käytetty muoto on kolmio, joka tekee luodusta rakenteesta sekä hyvin muuntautumiskykyisen että suhteellisen pienen tilaan pakkautuvan (Gibson ym. 2013 2.3, 15.2.1).

Luotu digitaalinen 3D-muoto kiedotaan siis prosessissa verkkorakenteeseen (engl. Mesh), joka koostuu sivuista toisiinsa liittyneistä tasapintaisista kolmioista eli faseteista. CAD-ohjelmistossa voi tavallisesti hallita monia syntyvän tesselaation ominaisuuksia, kuten rakennusobjektien määrää, kokoa ja niiden kulmien astevaihteluväliä. Mitä enemmän ja mitä pienempiä fasetit ovat, sitä sileämpi pinta kappaleeseen luonnollisesti syntyy (kuvanto 13). Samalla kuitenkin sen tiedostokoko suurenee ja usein myös valmistusaika pitenee. Lopullinen pinta koostuu normaalisti tuhansista, joskus jopa miljoonista faseteista. (Lipson & Kurman 2013, 5.3.0)

Luotu tesselaatio tallentuu koodiksi, jossa kunkin kolmion jokaiselle kärjelle on määritelty koordinaatiopiste sekä sen pinnalle suuntanormaali, joka kertoo, kumpi puoli luokitellaan sen ulko- ja kumpi sisäosaksi. Tiedostokoon rajoittamiseksi syntynyt koodi kirjoitetaan yleensä binäärimuotoon. (Gibson ym. 2013, 15.2.1.)

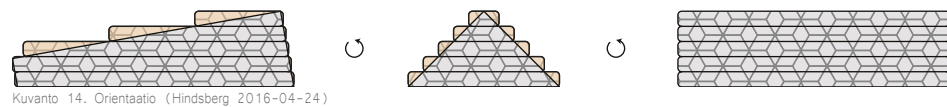


STL-tiedostomuodolla on takanaan pitkä ja kunnianarvoisa taival materiaalia lisäävän valmistuksen taustavoimana, mutta kuten suunnitteluohjelmistotkaan, se ei pysty enää optimaalisella tavalla vastaamaan AM-tekniikan mahdollisuuksiin. Alalle ollaankin kehitetty monia uusia tiedostotyyppejä, jotka soveltuvat paremmin tämän monipuolisen valmistustekniikan tarkoituksiin. Näihin ollaan muun muassa lisätty ominaisuuksia, joiden avulla tiedostoihin voidaan sisällyttää informaatiota väreistä, materiaaleista ja esimerkiksi monimutkaisista sisäisistä rakenteista. Yksi kehitetyistä tiedostomuodoista käyttää tunnistetta AMF, lyhenne sanoista *Additive Manufacturing Format*. Kyseinen muoto on kehitetty alalla toimivien ammattilaisten toimesta ASTM Internationalin, yhden maailman suurimman kansainvälisen standardin kehittäjän järjestön, alaisuudessa. AMF on virallisesti standardoitu jo vuonna 2010, mutta se kamppailee edelleen muiden uusien tiedostomuotojen rinnalla saavuttaakseen jalansijaa AM-maailmassa. (Lipson & Kurman 2013, 6.3.2.)

4.2 ORIENTAATIO JA TUKIRAKENTEET

Ensimmäinen askel suunnitteluohjelmiston ympäristöstä pois siirryttäessä on virtuaalisesti orientoida kappale AM-laitteen rakennusalustaan nähden ja määrittää sen mahdollisesti tarvitsemat tukirakenteet. Toiminnot ovat relaatiossa toisiinsa ja vaikuttavat molemmat lopputuloksena syntyvän kappaleen laatuun sekä viimeistelyn tarpeeseen.

Koska materiaalia lisäävä valmistus on yleensä kerroksittainen prosessi, jonka vertikaalinen ja horisontaalinen resoluutio useimmiten eroavat toisistaan, vaikuttaa rakennettavan kappaleen orientaatio suoraan sen pinnanlaatuun ja yksityiskohtien tarkkuuteen. Ohuimmistakin kerroksista jää aina jonkinasteinen porrastus seuraavaan tasoon nähden. Mitä vähemmän kalteva kappaleen horisontaalinen pinta on, sitä suuremmalle alueelle pieni määrä kynnyksiä jakaantuu tehden niistä huomattavampia, verraten esimerkiksi 45 asteen kulmassa olevaan pintaan, jonka porrasten leveys on vakio ja näin taso näennäisesti sileämpi (kuvanto 14). Asettelemalla kappale optimaalisesti, voidaan siis näkyvien porrasten määrää vähentää ja niiden pois viimeistelyä helpottaa. Tämä ei kuitenkaan ole ainut asia, johon valmistettavan objektin sijoittelu vaikuttaa, vaan myös tarvittavien tukirakenteiden määrä ja valmistuksen kesto ovat suoraan yhteydessä siihen, minkä suuntaisesti osa asemoidaan rakennusalustansa nähden. (Gibson ym. 2015, 3.7.1.)

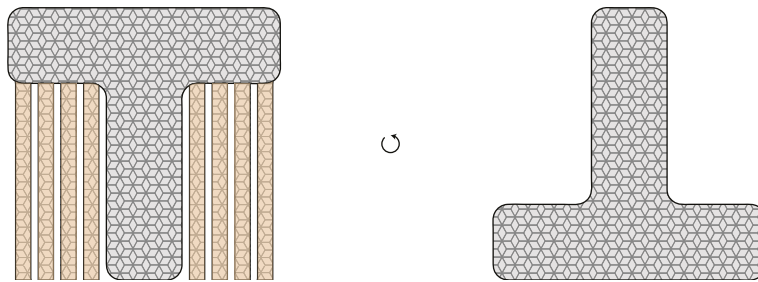


Tukirakenteet ovat valmistettavan kappaleen ulkopuolisia, siihen liitettyjä muotoja, jotka auttavat itse pääobjektia ylläpitämään muotonsa tuotantoprosessin aikana. Tukien tarpeelle on monia eri syitä ja ne vaihtelevat myös sovellettavan AM-tekniikan mukaan. Suurin näistä on yksinkertaisesti sellaisten kappaleen osien tukeminen, jotka luonnonlaeille altistuessaan ilman niitä romahtaisivat rakennusprosessin aikana. Yleisesti voidaan sanoa enintään noin 30–45 asteen kulmassa pohjatason z-akseliin nähden olevien rakenteiden olevan itseään tukevia, ja tästä horisontaalimpien pintojen tarvitsevan alleen ylimääräistä kannattelevaa massaa (Cooper 2014, 13–15, 18).

Muita syitä tukirakenteiden tarpeelle muodostuu esimerkiksi metallia raaka-aineenaan käyttävissä AM-tekniikoissa, joiden korkeat lämpötilat voivat aiheuttaa rakennettavaan kappaleeseen erilaisia vääristymiä, esimerkiksi vääntymiä, halkeamia ja kutistumia. Objekti pitää näiden epämuodostumien estämiseksi niin sanotusti ankkuroida rakennusalustaan. Kyseisissä prosesseissa myös kappaleen ja rakennustason riittävä lämpöä johtava yhdistäminen on tarpeellista, jotta sulatusalue jäähtyy mahdollisimman tehokkaasti ja nopeasti muodostaen näin materiaalisilta ominaisuuksiltaan parempia osia. (Cooper 2014, 1.)

Osassa prosesseja kiinteyttämätön raaka-aine toimii automaattisesti tukena rakennettavalle muodolle, ja osassa taas tuet on mahdollista valmistaa toisesta materiaalista, jolloin niiden poistaminen ei aiheuta vauriota osalle itselleen (Lipson & Kurman 2013, 5.3.1). Tekniikoissa, jotka vaativat tukirakenteiden käyttämisen samasta materiaalista itse kappaleen kanssa, kannattaa ne optimoida koko tuotantokaaren kannalta parhaimpaan muotoon. Laitteen mukana tuleva ohjelmisto on usein paras työkalu tukirakenteiden määrittelyyn, koska se on kehitetty vastaamaan juuri kyseisen tekniikan tarpeisiin. Käyttöliittymässä tukirangat saakin usein automaattisesti generoitua, jolloin ohjelma laskee sen valmistajan määrittämien parametrien mukaan tarpeellisen tuen kyseiselle kappaleelle. (Cooper 2014, 2, 6–7.) Haittapuolena tässä kuitenkin on, että mainitut ohjelmistot eivät osaa ottaa huomioon, mihin tukirakenteita olisi kappaleen laadun ja jälkityöstön kannalta kannattavinta sijoittaa, jolloin kyseisenlainen optimointi joudutaankin usein tekemään manuaalisesti.

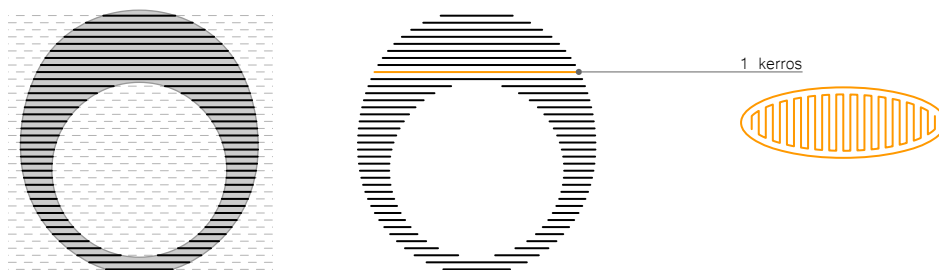
Kappaleen orientaatiolla on suuri vaikutus siihen, miten paljon ja millaisiin kohtiin tukia tarvitsee kiinnittää (kuvanto 15). Rakenteiden mahdollisimman vähäinen käyttö vähentää luonnollisesti suoraan myös jälkityöstön tarvetta. Lisäksi tukien määrä vaikuttaa suoraan valmistuksen kestoon ja varsinkin kalliita raaka-aineita käytettäessä niistä aiheutuva hukkamateriaali voi muodostua tärkeäksi tekijäksi rakenteita optimoitaessa. Lukumäärä ei kuitenkaan aina ole tärkein tekijä tukielementtejä määritettäessä, vaan niiden sijainti voi näytellä koko tuotantoprosessin kannalta jopa suurempaa osaa, samankaltaisesti kuin esimerkiksi valukappaleiden kanavien paikoituksessa. Enemmän tukirakenteita kohdassa, josta ne on helppo jälkikäteen poistaa, on usein parempi ratkaisu kuin vähemmän kohdassa, josta niiden jättämiä jälkiä on vaikea päästä siistimään. Toisaalta jos tukirakenteet saa kiinnitettyä sellaiseen osaan kappaletta, jossa niiden yhtymäkohta ei ole kovin näkyvällä paikalla, voidaan syntyvät jäljet mahdollisesti jättää kokonaan viimeistelemättä lopputuloksen tästä kärsimättä. (Cooper 2014, 2, 6–7, 13.)



Kuvanto 15. Orientaation vaikutus tukirakenteisiin (Hindsberg 2016-04-24)

4.3 VIIPALEMALLI

Orientoimisen ja mahdollisten tukirakenteiden generoimisen jälkeen valmistettavasta kappaleesta luodaan niin kutsuttu viipalemalli. Tämä tapahtuu yleensä niin ikään AM-laitteen mukana tulevan ohjelmiston käyttöliittymässä. Prosessissa kolmiulotteinen malli, jolla edellä esitetyssä tässä kohtaa vielä on olemassa tilavuus, pilkotaan (engl. *Slicing*) horisontaalisesti ohuiksi digitaalisiin siivuihin, jotka vastaavat laitteen seuraavassa vaiheessa valmistamien fyysisten kerrosten muotoa. (Lipson & Kurman 2013, 5.3.0.) Malli katkaistaan konkreettisesti valmistuksessa käytettävän Z-akselin suuntaisen resoluution mittaisen välimatkan jakaumalla. Luodut poikkileikkaukset ovat digitaalisessa muodossa kaksikulotteisia ja koostuvat niistä rajaavista reunavektoreista sekä sisäosan rasteroinnista, eli hyvin pienillä etäisyyksillä toisiinsa nähden sijaitsevasta viivoituksesta, jonka välimatkat fyysisessä muodossa katoavat ja luovat näin kiinteän pinnan (kuvanto 16). Jotkin ohjelmistot antavat käyttäjän hallita tämän rasteroinnin niin kutsuttua skannausstrategiaa, eli valita, minkä suuntaista viivoitusta pitkin ja mistä aloittaen materiaalia lisätään, kiinteitetään tai sidostetaan itse rakennusprosessissa. (Gibson ym. 2013, 15.2.3–15.2.4.) Skannausstrategia voikin osaltaan vaikuttaa kappaleen lopulliseen ulkonäköön sekä sen materiaalsiin ominaisuuksiin kuten eri suuntiin vetolujuuksiin.



Kuvanto 16. Viipalemalli (Hindsberg 2016-04-24)

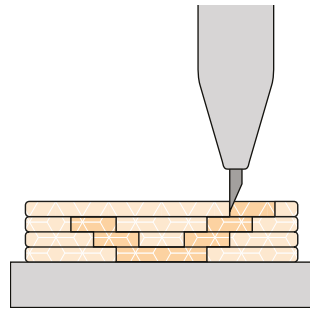
4.4 TIETOKONEAVUSTEINEN VALMISTUS, engl. Computer-aided Manufacturing (CAM)

Tietokoneavusteisessa valmistuksessa automaattinen, tietokoneohjattu valmistusjärjestelmä tuottaa fyysisiä kappaleita. Yleisimmät kategoriaan sijoitettavat teknologiat ovat CNC-koneistus, sorvaus ja erilaiset automatisoidut muottimenetelmät. AM-tekniikka sijoittuu näiden rinnalle omaksi luvukseksi.

4.4.0 MATERIAALIA LISÄÄVÄ VALMISTUS, engl. Additive Manufacturing (AM)

Materiaalia lisäävä valmistus rakentaa konkreettisia kappaleita asettamalla, sidostamalla tai kiinteyttämällä raaka-ainetta päällekkäisiksi kerroksiksi edellä kuvatus prosessin tuottaman datan ohjaamalla kaavalla. Laitteiden mekaaniset osat liikkuvat tavalla tai toisella vähintään kolmen akselin suuntaisesti: x- y- ja z-suuntiin, eli sivuille, eteen ja taakse sekä ylös ja alas. Yleisimmin tämä tapahtuu tulostinpään tai lämmönlähteen xy-suuntaisena liikkeenä ja rakennusalueen z-akselin mukaisena.

4.4.1 Laminointi, engl. Sheet Lamination



Kuvanto 17. Laminointi
(Hindsberg 2016-04-23)

PÄÄASIALLISET MATERIAALIT:
metalli, muovi, paperi

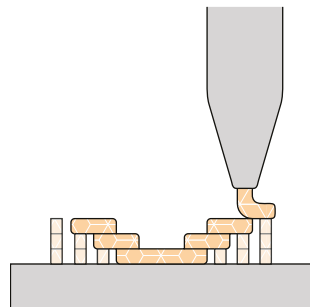
MUITA NIMITYKSIÄ TEKNIIKALLE:
laminated object manufacturing
layered object manufacturing
ultrasonic additive manufacturing

Laminointi-tekniikassa (Kuvanto 17) useita materiaaliarkkeja liitetään päällekkäin kolmiulotteisen kappaleen muodostamiseksi. Jokaisen arkin kiinnittämisen jälkeen kerros leikataan muotoonsa joko terällä tai laserilla. Ylimääräinen materiaali poistetaan vasta lopuksi, jolloin se valmistuksen aikana tukee varsinaista tuotosta. (Caffrey & Wohlers 2015, 37.)

Laminoinnin voidaan tavallaan sanoa sijoittuvan AM-tekniikoista lähimmäs sanan "tulostus" vakiintunutta merkitystä, sen yleisimmän materiaalin ollessa normaalienkin toimistotulostimien käyttämä paperi. Kyseisellä sovelluksella voidaan myös luoda värillisiä objekteja tulostamalla perinteisesti ensin jokaiselle käytettävälle arkille profiilikuva kerroksesta. (Caffrey & Wohlers 2015, 37.)

Tämä materiaalia lisäävä valmistustekniikka lasketaan lähinnä kuriositeetiksi, koska sillä ei tuotannollisessa mielessä ole huomattavaa arvoa. Teknologiaa käytetäänkin lähinnä taiteen ja esimerkiksi koulujen käyttötarkoituksiin. (Hoskins 2013, 47.)

4.4.2 Materiaalin pursotus, engl. Material Extrusion



Kuvanto 18. Materiaalin pursotus
(Hindsberg 2016-04-23)

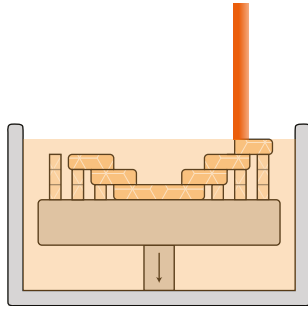
PÄÄASIALLISET MATERIAALIT:
biomateriaalit, keramiikka, muovi

MUITA NIMITYKSIÄ TEKNIIKALLE:
fused deposition modeling

Materiaalin pursotuksessa (Kuvanto 18) tulostuspään läpi annostellaan sulaa materiaalia nauhamaisessa muodossa rakennusalueelle kerroksittain. Yksinkertaisia muotoja pystytään valmistamaan ilman tukirakenteita, mutta huomattavan vaakasuuntaiset pinnat tarvitsevat aina alleen kannattelevia elementtejä, jotka joudutaan poistamaan jälkikäsittelyvaiheessa. (Caffrey & Wohlers 2015, 33-34.)

Materiaalin pursotus on AM-tekniikoista yleisin ja parhaiten tunnettu, johtuen laitteiden verrattain yksinkertaisten komponenttien tuomasta hyvästä hintalaatusuhteesta. Rakennustekniikan nauhamaisesta luonteesta johtuen tekniikalla ei kuitenkaan päästä parhaimmillaankaan kovin tarkkaan resoluutioon ja siksi niitä hyödynnetäänkin pääasiassa prototyyppien tuottamiseen. (Hoskins 2013, 44-46.)

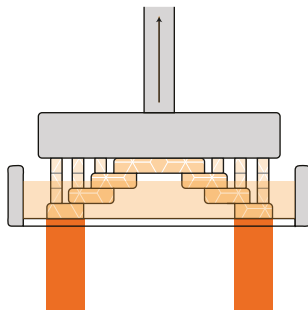
4.4.3 Allasvalopolymerisaatio, engl. Vat Photopolymerization



Kuvanto 19. Allasvalopolymerisaatio 1
(Hindsberg 2016-04-23)

PÄÄASIAALLINEN MATERAALI: harts

MUITA NIMITYKSIÄ TEKNIIKALLE:
digital light processing
stereolithography



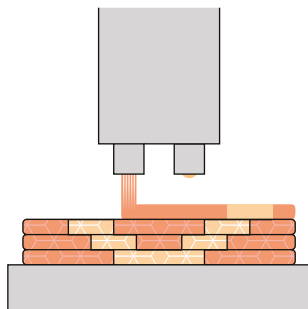
Kuvanto 20. Allasvalopolymerisaatio 2
(Hindsberg 2016-04-23)

Allasvalopolymerisaatio (Kuvanto 19) perustuu nestemäisen valokovetteisen hartsin kiinteyttämiseen. Prosessi alkaa rakennustason sijaitessa tulostustarkkuuden määrittämän kerrospaksuuden verran nesteeseen pinnan alapuolella. Valonlähde, yleensä laser, piirtää nesteen pintaan rakennettavan kappaleen ensimmäisen kerroksen mukaisen kuvion, kiinteyttäen materiaalia valon pyyhkäisemistä kohdista. Tämän jälkeen alusta laskeutuu kerrospaksuuden verran alemmaksi, uuden nestekalvon peittäessä jo tehdyn kerroksen seuraavaa varten. Tekniikka tarvitsee tukirakenteita saman periaatteen mukaan kuin edellä esitelty materiaalin pursotus. (Hoskins 2013, 44.)

Osa uudemmissa laitteista toimii käännetysti, muodostaen ohuen, kovetettavan nestekerroksen ylöspäin nousevan rakennustason ja nesteastian pohjan välille. Tällöin materiaalia kiinteyttävä valo tulee alhaalta päin, altaan läpinäkyvän pohjan läpi. Valonlähde voi kohdennettavan säteen sijasta olla myös eräänlainen projektori, joka heijastaa koko kerroksen siluetin samanaikaisesti. (Kuvanto 20) (Caffrey & Wohlers 2015, 38-39.)

Allasvalopolymerisaatiolla päästään huomattavan hyvälaatuisen ja yksityiskohtaisen pinnanlaatuun. Varsinkin jäljempässä kuvannossa esitetty projektori-tekniikka hyödyntävä sovellus tuottaa todella korkearesoluutioisia kappaleita ja onkin tästä syystä laajalti teollisuuden käytössä. Tekniikka skaalautuu kuitenkin huonosti suuremmille pinta-aloille, jolloin siitä tulee teknisesti haastavaa ja kallista toteuttaa. (Caffrey & Wohlers 2015, 38-39.)

4.4.4 Materiaalin ruiskutus, engl. Material Jetting



Kuvanto 21. Materiaalin ruiskutus
(Hindsberg 2016-04-23)

PÄÄASIAALLISET MATERAALIT:
harts, vaha, vahankaltainen

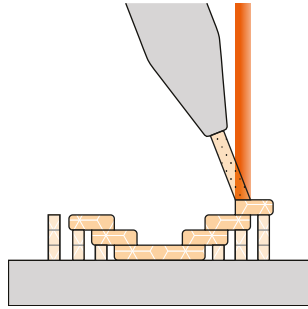
MUITA NIMITYKSIÄ TEKNIIKALLE:
material deposition
multi-jet modeling

Materiaalin ruiskutuksessa (Kuvanto 21) materiaaliainepisaroita suihkutetaan rakennus- alustalle kerroksittain mustesuihkutulostuspään avulla. Tekniikan raaka-aineena käytetään yleensä joko valokovetteista tai itsestään kiinteytyvää nestettä. Valmistettavaa kappaletta kannattelevana rakenteena hyödynnetään joko kiinteyttämätöntä materiaalia tai ominaisuuksiltaan erilaista raaka-ainetta toisesta tulostuspäästä, joka voidaan jälkikäsitellyssä liuottaa pois. (Caffrey & Wohlers 2015, 34-35.)

Materiaalin ruiskutus on AM-tekniikoista resoluutioltaan paras ja sen pinnanlaatua parantaa entisestään edellä mainittujen tukirakenteiden helppo ja pääasiallista kappaletta vahingoittamaton poistaminen. Tästä syystä teknologia onkin suosittu pienten ja yksityiskohtaisten kappaleiden kuten korujen vaha-aihioiden valmistuksessa.

Osa kyseistä AM-tekniikkaa hyödyntävistä laitteista voi rakentaa kappaleita muuttuvalla konsentraatiolla eri rakennusaineita. Näin kappaleen eri osilla voi olla toisistaan poikkeavia materiaalisia ominaisuuksia kuten vaikkapa erilaisia värisävyjä ja kovuusasteita. (Caffrey & Wohlers 2015, 34-35.)

4.4.5 Materiaalin ja lämmön kohdistus, engl. *Directed Energy Deposition*



Kuvanto 22. Materiaalin ja lämmön kohdistus
(Hindsberg 2016-04-23)

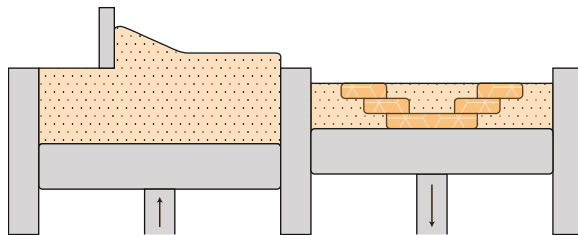
PÄÄASIALLINEN MATERIAALI: metalli

MUITA NIMITYKSIÄ TEKNIIKALLE:
blown powder AM
electron beam direct manufacturing
laser cladding

Materiaalin ja lämmön kohdistuksessa (Kuvanto 22) annosteltavaa materiaalia, yleensä jauhemaista, sulatetaan samanaikaisesti kohdistetulla lämpöenergialla. Prosessissa raaka-ainetta ohjataan kappaleeseen yleensä neli- tai viisiakselisen liikesysteemin tai robotiikan avulla, jolloin valmistus ei välttämättä rajoitu muiden tekniikoiden tavoin horisontaalisiin, toistaan seuraaviin kerroksiin. Tämä mahdollistaa myös materiaalin lisäämisen jo olemassa oleviin osiin, esimerkiksi korjaustarkoituksessa. (Caffrey & Wohlers 2015, 41-42.)

Tekniikassa voidaan käyttää useampaa eri materiaalia, joita pystytään omista tulostuspäistään yhtäaikaaisesti ohjaamaan energianlähteeseen. Näin tuotetut kappaleet voivat koostua esimerkiksi kautta osan vaihtelevalla pitoisuudella seostetuista metalleista. (Caffrey & Wohlers 2015, 41-42.)

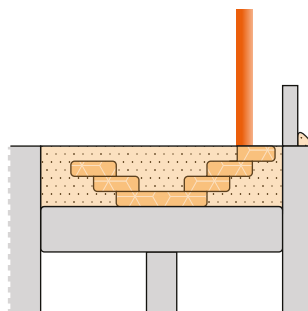
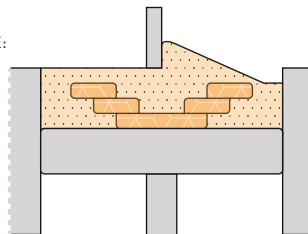
4.4.6 Jauhepetiteknikka, engl. *Powder Bed Fusion*



Kuvanto 23. Jauhepetiteknikka
(Hindsberg 2016-04-23)

PÄÄASIALLISET MATERIAALIT:
keramiikka, muovi, metalli

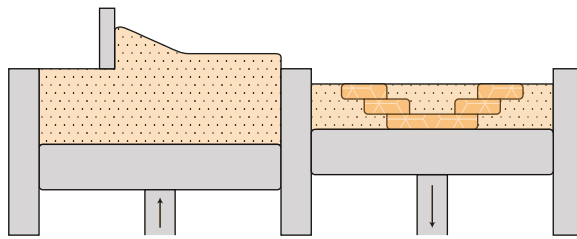
MUITA NIMITYKSIÄ TEKNIIKALLE:
direct metal laser sintering
electron beam melting
lasersintering
selective laser melting
selective laser sintering



Jauhepetiteknikassa (Kuvanto 23) tasaisen pulverikerroksen valikoituja osia sulatetaan lämpöenergian avulla. Syntyneet alueet yhdistyvät jäähtyessään kiinteäksi kerrokseksi. Tämän jälkeen rakennusalue laskeutuu kerrospaksuuden verran alaspäin ja vastaavasti erillisen materiaalivaraston pohja nousee, jolloin raaka-ainetta vapautuu levitettäväksi vielä tyhjään tilaan seuraavan kerroksen paikalle. Kiinteäytämätön rakennusmateriaali riittää yleensä tukemaan kappaletta valmistuksen ajan. (Caffrey & Wohlers 2015, 39-41.)

Jauhepetiteknikka on verrattain kallis materiaalia lisäävä valmistusmenetelmä. Korkeat kulut koostuvat käytettävistä materiaaleista ja niiden vaatimuksista. Prosessi tarvitsee esimerkiksi rakennuskammioonsa materiaalista riippuvan suojakaasun ja vaatii erityisiä turvajärjestelyjä. Jauhepetiteknikka tuottaa kuitenkin laadukkaita, varsinkin metallisia, lopputuotteita ja on tuotantomenetelmänä tehokas, minkä takia sen hyödyntäminen teollisuudessa onkin koko ajan lisääntyvää. (Caffrey & Wohlers 2015, 39-41.)

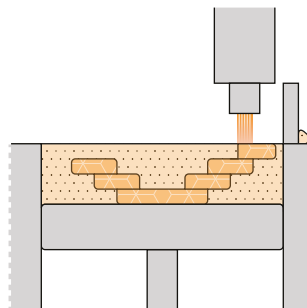
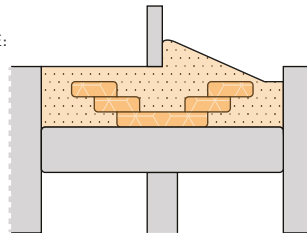
4.4.7 Sideaineen ruiskutus, engl. Binder Jetting



Kuvanto 24., Sideaineen ruiskutus
(Hindsberg 2016-04-23)

PÄÄASIAALLISET MATERIAALIT:
keramiikka, kipsi, metalli, muovi

MUITA NIMITYKSIÄ TEKNIIKALLE:
3-dimensional printing



Sideaineen ruiskutuksessa (Kuvanto 24) jauhemaista raaka-ainetta liitetään yhteen erillisen sidostusmateriaalin avulla. Nestemäistä sideainetta ruiskutetaan valikoiduille kohdin pulveripetiä yleensä mustesuihkutulostuspään avulla. Jauhemaista materiaalia levitetään rakennusalueelle samalla periaatteella kuin edellä kuvatussa jauhepetiteknikassa. Samoin se toimii prosessissa myös luonnollisena tukirakenteena. (Caffrey & Wohlers 2015, 35-37.)

Sideainetta ruiskuttamalla tuotetut kappaleet ovat verrattain hauraita ja niiden teollinen käyttöarvo onkin yleensä vain yhtenä askeleena valmistusprosessia. Esimerkiksi tällä tavoin tuotetut metalliosat voidaan prosessin jälkeen uunissa sintrata ja infiltroida toisella metallilla. (Caffrey & Wohlers 2015, 36.)

5 AM-TEKNIikka JALOMETALLIALALLA

Koru- ja jalometalliteollisuus on jo melko laajalti omaksunut materiaalia lisäävän valmistuksen hyödyntämisen ja sen tarjoamat edut. Ei niinkään käyttöesineiden tuotantoon orientoituneena alana muotoilu näyttelee korujen valmistuksessa luonnollisesti erityisen suurta osaa. Kun tuotteen materiaalin jälkeen tärkeimpänä arvotekijänä voidaan pitää sen ulkonäköä, on kysyntä innovatiivisille valmistustavoille, joiden avulla voidaan tuottaa uudenlaisia ja kilpailijoista poikkevia designeja, suuri.

Suomessa jalometalliteollisuuden voidaan myös katsoa olevan hyvin optimaalisessa mittakaavassa AM-tekniikan soveltamiseen. Tuotantomäärät eivät ole huomattavan korkeita, mutta monen yrityksen ja yksityisenkin elinkeinonharjoittajan valmistusta voidaan silti kutsua sarjatuotannoksi. AM-tekniikalla valmistetaan alalla objekteja lähinnä prototyypeiksi, valuprosessin vaha-aihoiksi ja koko ajan lisääntyvässä määrin myös itse lopputuotteiksi.

5.1 PROTOTYYPIT

Materiaalia lisäävä valmistus on alunperin kehittynyt tuotesuunnittelun tarkoituksiin luomaan vielä kehitysprosessissa olevista kappaleista karkeita kolmiulotteisia hahmotelmia, joiden avulla niiden fyysisiä ominaisuuksia voidaan testata. Huolimatta nykypäivän tottuneesta digitaalisuudesta, on kyseinen silti edelleen yksi AM-tekniikan käytetyimmistä sovellusalueista. Mikään, ainakaan vielä tähän päivään mennessä toiminnassa oleva, teknologia ei korvaa kappaleen käsissä pitelyä määriteltäessä sen toiminnallisia, ergonomisia ja muita taktiillisia ominaisuuksia. Kyseiset prototyypeiksi kutsutut vedokset nopeuttavatkin tuotekehitysprosessia huomattavasti auttaen niin suunnittelijoita, insinöörejä kuin valmistajakin tarkistamaan, että tuotteen kaikki suunnitellut ominaisuudet realisoituvat sen fyysisessä muodossa. Hahmomalleja voidaan myös käyttää esimerkiksi sovittamaan koottavan tuotteen osia yhteen tai toisen tuotantokaaren vaiheen testaamiseen, kuten toimivan sarjatuotantokaavan löytämiseen. (Lipson & Kurman 2013, 3.0–3.1.3.)

Koska teollisuuden prototyypit valmistetaan, jotta tuotteen ominaisuuksia voitaisiin tarkastella ennen sen tuotantoon asti viemistä, ei niitä ole kannattavaa, eikä usein edes mahdollista valmistaa saman tuotantoprosessin kautta kuin lopullista kappaletta. Prototyyppien tuottaminen palvelee myös prosessin tarkoitusta parhaiten silloin, kun havainnollistavan vedoksen tuottaminen on mahdollisimman nopeaa ja kustannustehokasta. Näin virheet huomataan lyhyemmällä aikataululla, variaatioita voidaan testata useampia ja potentiaalisesti itse lopputuotteenkin lanseerausta voidaan vauhdittaa. Materiaalia lisäävä valmistus mahdollistaa riittävän tarkan hahmomallin valmistamisen huomattavasti lyhyemmässä ajassa ja pienemmillä kustannuksilla kuin varsinaiseen tuotteeseen sovellettavat menetelmät. (Lipson & Kurman 2013, 3.0–3.1.3.) AM-tekniikan kautta tuotetut prototyypit ovat yleensä joko yrityksen itsensä hankkimalla halvemman luokan laitteella tuotettuja tai ulkopuolisen palveluntarjoajan kautta tilattuja.

Jalometalliteollisuudessa materiaalien ollessa hinnakkaita ja perinteisen tuotantoprosessin suhteellisen hidasta prototyypit ovat suosittu osa tuotekehityksen työskentelyprosessia. Toinen syy konkreettisten hahmomallien tarpeeseen on pienikokoisten tuotteiden yksityiskohtien visualisointi oikeassa koossa. Harjaantuneinkin ammattilainen voi suunnitteluvaiheessa menettää tuntuman lopullisen kappaleen ja sen detaliin mittasuhteisiin, ja tätä kautta sen sekä tuotannolliseen että visuaaliseen toimivuuteen. Näin tapahtuu erityisen helposti hyödynnettäessä tietokoneavusteista suunnittelua, jossa kappaletta käsitellään suurimman osan ajasta tietokoneruudulla moninkertaisessa koossa.

Onnistuneesti suunnitellulle korulle voidaan antaa monenlaisia mittapuita, joita tuotteen kehitysvaiheessa valmistetut prototyypit voivat auttaa saavuttamaan. Esimerkiksi kappaleen käyttömukavuutta on vaikea suunnitella optimaaliseksi ilman sen ergonomisten ominaisuuksien konkreettista testaamista prosessin aikana. Totta kai on olemassa oletuksellisia ja varsinkin ammattitaidon kartuttamia oletusarvoja, esimerkiksi vaikka sormuksen rungon hyväksi koetuille mittasuhteille joiden pohjalta muotoilija voi aloittaa prosessinsa. Uusien ja varsinkin hyvin monimutkaisten ja innovatiivisten mallien kohdalla kuitenkin näitä voi olla hyvin vaikea määrittää ilman fyysisen kappaleen todellista taktiillista tarkastelua. Korut ovat myös moneen muuhun tuotesuunnittelun sovellukseen nähden haastava kohde, koska niiden odotetaan jokapäiväisessä

elämässä vaivatta kulkevan mukana aamusta iltaan, eikä vain esimerkiksi tietyn toiminnon suorittamisen läpi. AM-tekniikka antaa tässä suunnittelijoille riittävän ja tarpeeksi tarkan edustuksen konseptinsa toiminnasta oikeassa elämässä.

Prototyypit ovat usein myös keino designerille esittää suunnitelmiaan ulkopuolisille. Tämä voi ulottua muusta tuotekehitystiimistä yrityksen eri osastoihin ja aina asiakkaalle asti. Vaikka nykyaikana tietokoneella pystytään generoimaan digitaalisista malleista valokuvatasoisia esityskuvia, on niissä silti vaikea tuoda esiin tuotteen kaikkia ominaisuuksia. Kun designkonsepteja pystytään demonstroimaan fyysisessä muodossa, saadaan useammille sen ominaisuuksista laajempi joukko mielipiteitä ja monet puutteet, jotka ilman prototyyppiä tulisivat esille vasta lopullisen tuotteen valmistuttua, nousevat esille huomattavasti aikaisemmassa vaiheessa. Näin pystytään välttämään monet tuotekehitysprosessin sudenkuopat ja säästytään sekä turhalta työltä että muiden arvokkaiden resurssien tuhlaamiselta. (Lipson & Kurman 2013, 3.0–3.1.3, 10.0)



Kuvanto 25. Muovinen Prototyyppi (Hindsberg 2016-05-16)

PROTOTYYPPI

Valmistaja:	Saurum Oy
Materiaali:	photoreaktiivinen harts
Laite:	Formlabs, Form 1+
Kerros paksuus:	25µm

5.2 VALUAIHIOT

Valun ollessa pääasiallinen tuotantotapa, ei vain korumaailmassa vaan myös monessa muussa metalliosien massatuotantoon perustuvassa teollisuudessa, on AM-tekniologiaa kehitetty ekstensiivisesti kattamaan myös sen tarpeet. Markkinoilta löytyykin monia materiaaleja, jotka on kehitetty nimenomaan metallien valuprosessiin sopiviksi (Caffrey & Wohlers 2015, 60).

Jalometallialan hyödyntämä kipsivalutekniikka asettaa tiettyjä vaatimuksia siinä aihioina käytettäville kappaleille. Prosessissa vahaiset, lopputuotteen tai sen osan muotoa vastaavat aihiot kiinnitetään yhteiseen runkoon jokaisen kappaleen omasta valua varten liitetystä kanavasta. Näin syntyy niin kutsuttu vahapuu, jonka ympärille muodostetaan kipsinen negatiivimuotti. Vahaiset aihiot poltetaan pois kipsin sisältä uunissa, jossa muotti samalla kovetetaan ja kuumennetaan itse valuprosessia varten. Soveltuakseen kipsivalussa käytettäväksi AM-tekniikalla tuotettujen kappaleiden tulee käyttäytyä prosessissa samoin kuin perinteiset vaha-aihiot. Ne ei eivät saa laajentua kuumetessaan, jottei muotti niiden ympäriltä halkea. Lisäksi niiden pitää palaa pois kipsikuoresta tekniikan käyttämien lämpötilojen puitteissa jättäen mahdollisimman vähän jäännösainesta. (Caffrey & Wohlers 2015, 60–61.)

Palvellakseen optimaalisesti korutuotannon tarpeita, tulee AM-tekniikalla tuotettujen kappaleiden olla valuun soveltuvan materiaalin lisäksi myös laadultaan riittäviä. Jalometalliteollisuuden artikkeleiden verrattain pienen koon ja yksityiskohtaisuuden takia niiden vaatima pinnanlaatu ja tarkkuus ovat valmistusprosessissa kynnyskysymyksiä. Tästä johtuen voidaan ammattialaan kannattavasti soveltaa vain tarkimpia materiaalia lisääviä valmistustekniikoita. Suurimman resoluution tarjoavana materiaalin ruiskutus onkin teknologioista ehdottomasti kyseisen alan

käytetyin. Sen lisäksi että tekniikka tarjoaa kappaleille parhaimman yleislaadun, on sen etuna myös mahdollisuus monimateriaaliseen valmistukseen. Tätä pystytään hyödyntämään rakentamalla varsinaisen kappaleen ympärille tukirakenne toisesta materiaalista. Tässä hyödynnetään yleensä raaka-ainetta, jonka pystyy prosessin jälkeen liuottamaan jättämättä jälkeäkään lopputuotteena syntyvään aihioon. Materiaalin ruiskutus on myös AM-tekniikoista ainut, joka pystyy rakentamaan kappaleita perinteiselle valutuotannolle täysin identtisestä vahamateriaalista. Näin sitä kautta tuotetut artikkelit pystytään saumattomasti liittämään osaksi olemassa olevaa tuotantoprosessia. Myös kappaleen tarkkuus on usein erottamaton jyrityn vastineensa pinnanlaadusta, pois lukien huomattavan laakeat kuperat tai koverat tasot, joille materiaalia lisäävän valmistuksen porrasrakenne edelleen jää selkeästi näkyviin.



Kuvanto 26. Vaha-aihio (Hindsberg 2016-05-16)

VAHA-AIHIO

Valmistaja:

Raiskisen koruvalimo

Materiaali:

vaha

Laite:

3D systems,
ProJet 3500 CPXMax

Kerrospaksuus:

20µm



Kuvanto 27. Vaha-aihio valettuna hopeaan (Hindsberg 2016-05-16)

VALETTU VAHA-AIHIO

Valmistaja:

Raiskisen koruvalimo

Materiaali:

925 Hopea

5.3 METALLISET LOPPUTUOTTEET

AM-tekniikalla tuotetaan koko ajan lisääntyvässä määrin myös lopputuotteita. Näissä täytyy kuitenkin ottaa huomioon että aikaisemmin perinteisillä valmistusmenetelmillä, teoriassa samoista raaka-ainesta valmistetut kappaleet voivat olla materiaalia lisäävän valmistuksen keinoin tuotettuina ominaisuuksiltaan huomattavasti edeltäjistään eroavia. Päällisin puolin toisiaan

muistuttavat tuotteet ovat usein erilaisen rakennustapansa johdosta mikro- ja nanomittakaavan rakenteiltaan hyvinkin eroavaisia.

Suurin osa metallisia osia rakentavista AM-prosesseista sulattaa raaka-aineensa täysin ja tuottaa kappaleita, jotka lähestyvät 100 % tiheyttä. Vaikeivät kaikki kappaleet ole täysin tiiviitä, ovat ne silti materiaalisilta ominaisuuksiltaan yliveraisia valettuihin osiin nähden ja pääsevät todella lähelle työstetyn metalliaineksen vastaavia. Valuprosessissa sulan materiaalin jäähtyminen alkaa nopeasti kappaleen viileimmästä osasta, sen ulkopinnasta. Tämä johtaa kuoren hienostuneeseen, materiaalisilta ominaisuuksiltaan hyvään rakenteeseen. Jähmettymisen edetessä kiderakenne kuitenkin muuttuu pitkänomaiseksi ja orientoituu kohti kappaleen vielä sulaa keskustaa. Kiinteytymisen hidastuessa kiteet tapaavat suurentua, mikä johtaa vastaavaan vähenemiseen kappaleen materiaalisissa ominaisuuksissa. Tällainen vaiheittainen jäähtymisprosessi vaikuttaa seosmetalleissa myös siihen, että alkuaine jolla on alhaisin sulamispiste, kiinteytyy ensin ja näin keskikohtaa lähestyttäessä kiteiden eri metallien pitoisuudet vaihtelevat hieman. Materiaalin ominaisuudet eivät näin ole isotooppiset, eikä niihin pystytä vaikuttamaan. AM-metalliprosessit taas sulattavat hyvin pienen määrän raaka-ainetta kerralla, mikä luonnollisesti johtaa myös pikaiseen jäähtymiseen ja kiinteytymiseen. Näin syntyneet mikrostruktuurit ova kauttaaltaan hienorakenteisia ja yhtenäisiä. (Caffrey & Wohlers 2015, 54–57.)

Materiaalia lisäävän valmistuksen hallittu rakennustapa mahdollistaa myös tuotettujen kappaleiden mikrostruktuuriin vaikuttamisen. Hallitsemalla valmistuksen muuttujia kuten osan orientaatio, energiasäteen skannauskuvio ja sen arvot sekä sulatusalueen koko ja jäähtymistahti, voidaan tuotteelle luoda hyvinkin tarkkaan kontrolloituja kristallografisia tekstuureja. Tämä mahdollistaa tarkoituksenmukaisten materiaalien ja mekaanisten ominaisuuksien kehittämisen ja niiden vaihtelun kappaleen eri osien välillä. Monet näistä rakenteista ovat ennenaikemättömiä ja mahdollisia saavuttaa vain materiaalia lisäävällä valmistuksella. Mikrorakenteilla voidaan vaikuttaa huomattavasti esimerkiksi kappaleen vetolujuuksiin ja rakenteen haurauteen. Jälkimmäistä voidaan hyödyntää esimerkiksi rakentamalla varsinaista osaa huomattavasti heikompia tukirakenteita, joiden poisto näin helpottuu. (Caffrey & Wohlers 2015, 54–57.)

Jalometallialan lopputuotteisiin sovellettavia AM-tekniikoita ovat jauhepetiteknikka ja sideaineen ruiskutus, joista molemmat hyödyntävät raaka-ainetta pulverimaisessa muodossa. Näistä ensin mainittu on huomattavasti suositumpi, koska jälkimmäinen tuottaa kappaleita, joissa metallijauheesta on muodostettu kiinteä objekti sideaineen avulla, ei sulattamalla. Tämä tekee ainoastaan AM-prosessin läpikäyneistä osista huomattavan hauraita ja ne pitääkin jälkikäsiteltynä käyttää uunissa, jossa sidostamiseen käytetty aine poltetaan pois ja tilalle infiltroidaan toista, alemman sulamispisteen metallia. Jauhepetiteknikkakin tuo metalleihin sovellettuna omat haasteensa. Johtuen prosessin korkeista lämpötiloista ja sulan metallin ominaisuuksista pelkkä kiinteyttämätön pulveri ei ole tarpeeksi tukemaan rakennettavaa kappaletta, kuten muiden tekniikan käyttämien materiaalien kanssa. Tukirakenteet ankkuroivat lisäksi rakennettavan kappaleen paikoilleen ja estävät tässä myös niinkään lämmöstä sekä uuden jauhekerroksen mekaanisesta levityksestä aiheutuvasta liikkeestä johtuvia epämuodostumia. Tuet näyttelevät osaa myös edellä kuvatun hienostuneen mikrorakenteen muodostumisessa; Lämpöä johtavina rakenteina, suuremman tilavuuden omaavaan metalliseen rakennusalaan kiinnitettynä, ne jäädyttävät kappaletta tehokkaasti. (Caffrey & Wohlers 2015, 54–59.)

Huolimatta jauhepohjaisten AM-menetelmien verrattain pienestä kerrospaksuudesta ja tätä kautta kappaleen korkeasta kokonaisresoluutiosta niillä tuotettujen objektien pintarakenne jää raaka-aineen luonteesta johtuen rakeiseksi. Tämä ei useinkaan ole toivottava ominaisuus jalometalliteollisuudessa, ja tästä syystä tekniikan käyttö rajoittuukin tällä hetkellä kappaleisiin, joissa pintastruktuuri on joko otettu osaksi designia tai joista se on kohtalaisen helposti tasoitettavissa. Manuaalisesti hiomalla ja kiillottamalla kappaleessa pystytään säilyttämään hyvinkin paljon yksityiskohtia, mutta tällaisen viimeistelyn kulut nousevat yleensä huomattavan korkeiksi. Mekaanisesti käsittelemällä, kuten rumpuhiomalla, kappaleesta taas saadaan taloudellisemmin viimeistellympi, mutta pintakarkeuden määrästä johtuen, tässä menetetään huomattavan paljon yksityiskohtia käsittelyn kuluttaessa kappaleen ulkonevia osia muuta pintaa enemmän.

Jauhepohjainen materiaalia lisäävä valmistus on myös verrattain hinnakasta ja tämä on totta varsinkin sen metallisovellusten kannalta. Prosessit ovat hyvin tarkkoja raaka-aineen laadusta. Erityisesti jauhepetiteknikassa hiukkasten tulee olla tasaisen kokoisia ja pyöreäköjiä, koska se luottaa yhdenmukaiseen, tiheään jauhekerrokseen ennen sen selektiivistä sulattamista. Koska tässä kerros pyyhkäistään paikalleen aina jonkinlaisen levittimen avulla, myös materiaalin

juoksevuus on avainasemassa. Esimerkiksi materiaalin ja lämmön kohdistus ei luo aivan näin tiukkoja vaatimuksia käytettävälle raaka-aineelle, koska tekniikan on edellä kuvattuun verrattuna helppo ruiskuttaa metallipulveria energialähteeseen. Näin pienten hiukkasten, pulveripetiteknikassa alle 100 mikronia, optimaalisesti noin 30–40, tuottaminen tapahtuu lähes yksinomaan kaasuatomisaation kautta. Toimenpide on monimutkainen ja sen hinta nostaa näin raaka-ainekustannukset korkeiksi. (Caffrey & Wohlers 2015, 57–59.) Kallista materiaalia vaaditaan valmistuksen mahdollistamiseksi myös huomattavasti kulloinkin tuotettavaa kappaletta suurempi määrä. Esimerkiksi jauhepetiteknikan prosessin mahdollistamiseksi raaka-ainetta pitää aina olla saatavilla koko rakennuskammion täyttävä tilavuus, jolloin alkukustannukset varsinkin jalometalleja hyödyntävälle valmistukselle ovat huomattavat. (Heikkinen 2016.)

Toinen metalleja hyödyntävän jauhepetiteknikan kulujen nostaja on, että prosessi tarvitsee raaka-ainepulverin käsittelylle hyvin hallitut olosuhteet. Niin itse suljetun rakennuskammion sisällä, jossa käytetään aina jonkinlaista suojakaasua, kuin myös laitetta ympäröivässä huoneilmassa, jonka kanssa jauhe pääsee kosketuksiin itse AM-rakennusprosessiin liittyvien esivalmistelujen ja syntyneen kappaleen laitteesta purkamisen aikana. Myös metallien jälkityöstöön tarvittava konekanta on verrattain kallista muihin materiaalia lisäävän valmistuksen käyttämiin raaka-aineisiin verrattuna. Tarpeellisia näistä ovat vähintään tukirakenteiden aiheuttamien jälkien poistoon käytettävät hiomalaitteet, sekä prosessin rakeiseksi jättämän pinnan mahdollisesti tasoittava perinteinen koneistus. (Heikkinen 2016.)



Kuvanto 28. Metallituloste (Hindsberg 2016-05-16)

LOPPUTUOTE

Valmistaja:	AM-Finland Oy
Materiaali:	925 Hopea
Laite:	Concept Laser, MLab cusing
Kerrospaksuus:	15µm

6 POHDINTA

AM-ala on siitä mielenkiintoinen, että vaikka se on ollut olemassa jo vuosikymmeniä ja yleistyy koko ajan huimaa vauhtia teollisuuskäytössä, on se silti niin sanotusti edelleen alkutaipaleellaan. Voitaisiinkin todeta, että emme ole teollisen valmistamisen valtamereissä nähneet materiaalia lisäävän valmistuksen jäävuoresta vielä edes sen 10 % käsittävää huippua (Boivie 2016). Tämä kuvaa osuvasti AM-tekniikan potentiaalisia tulevaisuuden mahdollisuuksia, joita on hyvin vaikea lähteä edes spekuloidaan. Kaikki teknologiaa tälläkin hetkellä soveltavat tahot ovat tavallaan vasta opettelemassa sen sääntöjä ja kannattavaa hyödyntämistä. Koru- ja jalometallialan tulevaisuudelle suurimman muutoksen tuo varmasti tulevaisuudessa tapahtuva metallitulostuksen kehittyminen, jonka pohjalta voi hyvinkin todennäköisesti jonain päivänä olla mahdollista luoda täystiheästä raaka-aineesta työstettyjen kappaleiden kanssa laadultaan samankaltaisia tuotteita, joiden muoto ei kuitenkaan ole rajoitettu kyseisen työstön kapeisiin mahdollisuuksiin. Tämän lisäksi on mielenkiintoista millaisia sovelluksia kappaleiden mikro- ja nanotason hallituille rakenteille keksitään omalla alallamme.

Päällimmäisenä opinnäytetyöprosessin aikana mieleeni piirtynyt asia materiaalia lisäävästä valmistuksesta on alan tietoperusteisuus. Uudet suunnittelulliset mahdollisuudet, jotka poistavat muodon rajoitteita, on vielä verrattain helppo soveltaa käytäntöön teknologian tuodessa paljon vähemmän uusia ehtoja näiden tilalle. Kuitenkin valmistustekniikoiden vaatiessa perinteistä enemmän niiden pohjana olevilta 3D-tiedostoilta, tarvitsee niiden rakentaminen näin myös aikaisempaa enemmän ammattitaitoa. Tämä on asia, jonka olen saanut konkreettisesti jo aikaisemmin huomata omassa työssäni; On paljon helpompi mallintaa kappale CNC-jyrsimellä valmistettavaksi, joka parhaimmillaan tarvitsee valmiin pintamallin vain yhdestä kuvakulmasta katsottuna, eikä senkään tarvitse olla mallinnusteknisesti yhdessä osassa jotta prosessi tuottaisi hyvälaatuisen ja tarkoituksenmukaisen objektin. AM-tekniikalla valmistettavan kappaleen taas pitää olla huolellisesti ja johdonmukaisesti koottu yhtenäinen kokonaisuus, jotta aikaansaadaan ylipäättään minkäänlaista konkreettista tuotosta. Materiaalia lisäävän valmistuksen koko potentiaalin valjastaakseen taas täytyy sen soveltajalla olla kokonaisvaltainen tuntemus ja ymmärrys käytettävän tekniikan toimintaperiaatteesta sekä sen muuttujien vaikutuksista tuotettujen kappaleiden ominaisuuksiin. Varsinkin jälkimmäisiä tarkoituksellisesti hallitakseen täytyy tuntea koko tuotantoketjuun vaikuttavat tekijät aina pohjatiedoston vaatimuksista, sen konvertoimisen kautta valmistustekniisiin asioihin saakka. Tärkeän osan muodostavat myös materiaalien ja tässä tapauksessa niiden metallurgisten ominaisuuksien tuntemus. Edellä esitettyihin pointteihin nähden katson opinnäytetyöni aihevalinnan olleen onnistunut ja omia ammatillisia pyrkimyksiäni edistävä.

Opinnäytetyölle asettamani tavoite oman ammattitaitoni ja -tietämykseni kehittämisestä on ehdottomasti toteutunut. Olen mielestäni koonnut itselleni totuudenmukaisen, faktoihin ja luotettavaan lähdeaineistoon pohjautuvan teoreettisen tietopohjan materiaalia lisäävästä valmistuksesta ja sen mahdollisuuksista muotoilun ja oman alani teollisen tuotannon näkökulmasta. Tämä pohjautui prosessissa pitkälti lähdekriittisyyteen, sillä luvun 2.2.2 kuvaamalla tavalla tutustumani teknologia on viime vuosina saanut paljon julkisuutta ja näin ollen siitä kertovia aineistoja on huomattava määrä. Yllättäväkin moni näistä, ihmetyksekseni myös usea painettu teos, antaa aiheesta virheellistä ja väärin yksinkertaistettua tietoa. Olenkin käyttänyt huomattavasti aikaa alalla ansioituneiden henkilöiden löytämiseen ja heidän tekstiensä tutkimiseen sekä vertailevaan tarkistukseen. Lähes kaikki työhön ylöskirjaamani faktat onkin hankittu vähintään kahdesta eri lähteestä, joista ainakin toisen koen olevan luotettavaksi luokiteltava. Tällainen lähdekritiikki osoittautua valitettavasti hyvin aikaavieväksi ja venyttikin aikatauluani jonkin verran ja oli lisäksi ajoittain haitallista oppimisprosessille, kun juuri luettu tieto piti monesti seuraavassa hetkessä leimata virheelliseksi. Tämä prosessin epäkohta ei kuitenkaan mielestäni ole vaikuttanut lopputuloksen laatuun.

Toinen hidastava tekijä on ollut kaiken luotettavuusseulani läpäisseen kirjallisen aineiston vieraskielisyys. Ongelmana ei niinkään ole ollut tekstin ymmärtäminen, vaan sen suomenkieliseen muotoon kääntäminen. Monille alan termeille ei ole vielä kehitetty suomalaisia vastineita, vaan niitä on suurimmilta osin suullisesti vakiintunut toimialan ihmisten keskuudessa. Tästä syystä työni sisältää myös englanninkieliset avainsanat sulkeissa muun tekstin yhteydessä lisätiedon etsimistarkoitustakin ajatellen. Olen opinnäytetyöprosessin aikana muutamaa otteeseen kyseenalaistanut valintani koostaa työni suomeksi, mutta seison silti ratkaisuni takana, koska koen sen olleen oppimani sisäistämisen kannalta edesauttava tekijä sekä tarkoituksenmukainen

lähestymistapa kun tavoitteena on kehittää omaa ammattitaitoa tämänhetkiselle urapolulle Suomen rajojen sisäpuolella.

Opinnäytetyössäni aikaavievän lähdekritiikin ja vieraskielisyyden lisäksi prosessia on hidastanut myös aiheen löyhä alkuperäinen rajaus. Koska aloitin työn verrattain suuressa viitekehityksessä sillä ajatuksella, että eteneminen tapahtuisi itse prosessin ohjaamana ja sen aikana hankittujen uusien tietojen suuntaan viitoittamana, harhauduin monesti sivupoluille, joita en loppujenlopuksi voinut tässä työssä hyödyntää. Koen tämän kuitenkin olleen samalla myös rikkaus, koska en näe kompastuneeni yhteenkään asiaan, jonka en omien mielenkiintojeni ja urani kannalta koe olleen hyödyllistä, vaikkeivät ne kaikki opinnäytetyöni raameihin sopineetkaan. Koen myös tästä tavallaan epäjohdonmukaisesta työskentelytavastani huolimatta onnistuneeni rakentamaan ehyen ja perustellun opinnäytetyökokonaisuuden, joka selkeästi tuo yhteen tavoitteilleni relevantit asiayhteydet. Mielestäni olen myös esitellyt osiot jäsennellysti ja varsinkin tuottamani laajan graafisen aineiston olevan hyvin havainnollista ja tarkoituksenmukaista. Kokonaisuuden on myös todettu olevan opetusmateriaaliksi sopivaa (Nylund 2016). Lisäksi kyseinen kuvallinen materiaali on huomattavasti tukenut omaa soveltavaa ja visuaalista oppimistapaani ja uskonkin sen olevan yksi suurimmista syistä läpikäymieni asioiden onnistuneeseen sisäistämiseen.

Edellä kuvatulla etenemistavalla löytämäni algoritmiavusteinen suunnittelu oli omasta näkökulmastani työni odottamattomin käänne, ja harkitsin tarkkaan, voinko sisällyttää sen kokonaisuuteen. Totesin kuitenkin sen olleen omalle prosessilleni ja henkilökohtaisille mielenkiinnonkohteilleni niin merkittävä osio, etten halunnut jättää aihetta varsinaisen työn ulkopuolelle, enkä myöskään vain pieneksi sivuhuomioksi. Koen lopulta onnistuneeni sulkemaan algoritmipohjaisen muotoilun sujuvasti työn sisään ja sen olevan perusteltu osa mainittua; Kyseistä voidaan verrata samanlaisena rajoitusten poistajana henkisellet muotoiluprosessille kuin AM-tekniikkaa konkreettisten kappaleiden tuottamiselle. Lisäksi olisin joka tapauksessa tarvinnut suunnitteluprosessin, jonka avulla toteuttaa korukonseptin fyysisiä mallikappaleita varten.

Kokonaisuutena opinnäytetyöni venyi huomattavasti alkuperäistä aikataulua pidemmälle ajanjaksolle edellä esittelemieni prosessin hidasteiden lisäksi myös kokopäivätyöni aikaavievän luonteen takia. Lopputulokseen olen kuitenkin itse tyytyväinen, enkä koe pitkittyneelle ajanjaksolle jakaantuneen työskentelyn vaikuttaneen negatiivisesti kokonaisuuteen. Prosessi on antanut minulle huomattavasti odotettua enemmän ja uskon sen tulevaisuudessa hyödyttävän urakehitystäni huomattavasti. Koen opinnäytetyöni avulla kartuttamani ammattitietämyksen pohjalta pystyväni tekemään tärkeimmäksi tavoitteeksi määrittelemiäni perusteltuja päätöksiä tutustumani teknologian mahdollista hyödyntämistä koskien. Pystyn myös johdonmukaisesti antamaan syyt päätöksilleni ja selittämään niiden taustat muille asianomaisille henkilöille. Olen myös ilokseni huomannut kykeneväni käymään aiheeseen liittyvä asiantuntevaa keskustelua alan ammattilaisten kanssa niin suomen kuin englanninkin kielellä.

LÄHTEET

- BARACK, Obama 2013-02-12. President of the United States.
STATE OF THE UNION ADDRESS 2013. [Puhe]
Washington, D.C: United States Capitol Building. Kirjoitettu versio saatavissa:
<https://www.whitehouse.gov/the-press-office/2013/02/12/remarks-president-state-union-address>
- BOIVIE, Klas 2016-04-14. Principal R&D Engineer, Sandvik AB; ISO/TC 261 ja ASTM F42 -jäsen.
ADDITIVE MANUFACTURING. [Luento] Suomen pikavalmistusyhdistys FIRPA Ry:n vuosiseminaari.
Vantaa: Vantaan energia areena.
- CAFFREY, Tim 2015. BSME.; Senior Consultant, Wohlers Associates Inc.
& WOHLERS, Terry. Principal Consultant & President, Wohlers Associates Inc.; ASTM F42 -jäsen
WOHLERS REPORT 2015 – 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry – Annual Worldwide
Progress report.
Colorado: Wohlers Associates, Inc.
- COOPER, Frank 2014. Senior Lecturer & Technical Manager, School of Jewellery, Birmingham City University.
DMLM SUPPORTS: Are they the jewelry industry's new sprue, riser and gate feed? [Essee]
The Precious project -projektin tulokset [viitattu 2016-04-21]
Saatavissa: <http://www.precious-project.co.uk/downloads/results/frank-cooper-SFS-2014.pdf>
- FIRPA ry. n.d. Suomen Pikavalmistusyhdistys/ Finnish Rapid Prototyping Association.
SANASTO. [verkkosivusto] [viitattu 2016-04-24]
Saatavissa: <http://www.firpa.fi/html/sanasto.html>
- FIRPA ry. 2014. Suomen Pikavalmistusyhdistys/ Finnish Rapid Prototyping Association.
& LEHTINEN, Kati. FM. DI.
TRILINGUAL GLOSSARY – KOLMIKIELINEN SANASTO. [verkkoaineisto] [viitattu 2016-04-24]
Saatavissa: http://www.firpa.fi/html/sanasto_html.html
- GARTNER 2016.
GARTNER HYPE CYCLE. [verkkoaineisto] [viitattu 2016-03-30]
Saatavissa: <http://www.gartner.com/technology/research/methodologies/hype-cycle.jsp>
- GIBSON, Ian 2015. Interim Head Of School, School of Engineering, Deakin University, Victoria, Australia.
& ROSEN, David. Professor, Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA.
& STUCKER, Brent. Chair of Computer Aided Engineering, University of Louisville, USA.
ADDITIVE MANUFACTURING TECHNOLOGIES. 2.painos. [E-kirja]
New York: Springer New York.
- HEIKKINEN, Timo 2016-01-19. Toimitusjohtaja, AM-Finland Oy.
AM-METALLITULOSTUS. [Luento] 3D-tulostuksen mahdollisuudet teollisessa tuotannossa -työpaja.
Siilinjärvi: Yrityskeskus Innocum.
- HOSKINS, Stephen 2013. Director, Centre for Fine Print Research, University of the West of England Bristol.
3D PRINTING FOR ARTISTS, DESIGNERS AND MAKERS.
London: Bloomsbury.
- ISO/ASTM 52900:2015 2015.
ADDITIVE MANUFACTURING – GENERAL PRINCIPLES – TERMINOLOGY.
International Organization for Standardization. [Standardi] [viitattu 2016-03-15].
Saatavissa: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en>
- LIPSON, Hod 2013. Professor of Mechanical Engineering, Columbia University, NYC, USA.
& KURMAN, Melba. B.S.; Technology Writer, Analyst, Popular Blogger.
FABRICATED: The New World of 3D Printing. [E-kirja]
Indianapolis: John Wiley & Sons, Inc.
- NYLUND, Risto 2016-05-13. Lehtori, Koru- ja jalometallimuotoilu, Savonia-ammattikorkeakoulu.
OHJAAJAN PALAUTE [Suullinen tiedonanto]. Opinnytetyön arviointiseminaari, Sanna Hindsberg.
Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.
- SHISKOV, Radul 2016. M.Arch; Tutor, Associate DesignMorphine.
ALGORITHMIC ACCESSORIES V1.0 [workshop].
Wien: Hotel am Brillantengrund.
- TEDESCHI, Arturo 2014. Complemented professional Architect, Independent Researcher and Computational Designer.
AAD_ALGORTIHMS AIDED DESIGN – Parametric strategies using Grasshopper.
Brienza: Le Penseur.

TUOTETUT AINEISTOT

KUVANTO 1. Kerroksittaisuus [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 2. 3D-tulostuksen vaiheet Gartnerin hypekäyrällä 2008–2015 [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23, (mukaillen GARTNER 2008–2015).

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

(GARTNER'S 2015 HYPE CYCLE FOR EMERGING TECHNOLOGIES Identifies the Computing Innovations That Organizations Should Monitor. [Verkkajulkaisu] [viitattu 2016-04-23]

Saatavissa: <http://www.gartner.com/newsroom/id/3114217>

GARTNER'S 2014 HYPE CYCLE FOR EMERGING TECHNOLOGIES Maps the Journey to Digital Business. [Verkkajulkaisu] [viitattu 2016-04-23]

Saatavissa: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2819918>

GARTNER'S 2013 HYPE CYCLE FOR EMERGING TECHNOLOGIES Maps Out Evolving Relationship Between Humans and Machines. [Verkkajulkaisu] [viitattu 2016-04-23]

Saatavissa: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2575515>

GARTNER'S 2012 HYPE CYCLE FOR EMERGING TECHNOLOGIES Identifies "Tipping Point" Technologies That Will Unlock Long-Awaited Technology Scenarios. [Verkkajulkaisu] [viitattu 2016-04-23]

Saatavissa: <http://www.gartner.com/newsroom/id/2124315>

GARTNER'S 2011 HYPE CYCLE Special Report Evaluates the Maturity of 1,900 Technologies. [Verkkajulkaisu] [viitattu 2016-04-23]

Saatavissa: <http://www.gartner.com/newsroom/id/1763814>

GARTNER'S 2010 HYPE CYCLE Special Report Evaluates Maturity of 1,800 Technologies. [Verkkajulkaisu] [viitattu 2016-04-23]

Saatavissa: <http://www.gartner.com/newsroom/id/1447613>

GARTNER'S 2009 HYPE CYCLE Special Report Evaluates Maturity of 1,650 Technologies. [Verkkajulkaisu] [viitattu 2016-04-23]

Saatavissa: <http://www.gartner.com/newsroom/id/1124212>

Gartner Highlights 27 Technologies in the 2008 HYPE CYCLE FOR EMERGING TECHNOLOGIES. [Verkkajulkaisu] [viitattu 2016-04-23]

Saatavissa: <http://www.gartner.com/newsroom/id/739613>)

KUVANTO 3. Negatiiviset pinnat [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 4. Lomittaiset osat [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 5. Toisiinsa lukittuneet osat [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 6. Sisäiset rakenteet 1 [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 7. Sisäiset rakenteet 2 [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 8. Orgaaniset kappaleet [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 9. Osan monimutkaisuuden kustannukset [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-05-07, (mukaillen BOIVIE, Klas 2016).

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

(ADDITIVE MANUFACTURING [Luento]. Suomen pikavalmistusyhdistys FIRPA Ry:n vuosiseminaari.

Vantaa: Vantaan energia areena.)

KUVANTO 10. Naked edges [Kuvankaappaus].

HINDSBERG, Sanna 2016-05-07.

Robert McNeel & Associates: Rhinoceros® 5.0

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 11. Algoritmi [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-05-07, (mukaillen TEDESCHI, Arturo 2014).

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

(AAD_ALGORTIHMS AIDED DESIGN – Parametric strategies using Grasshopper.

Brienza: Le Penseur.)

KUVANTO 12. Algoritmiavusteinen suunnitelu [Kollaasi].

HINDSBERG, Sanna 2016-05-08.

Kuvankaappaukset Robert McNeel & Associates: Rhinoceros® 5.0, Grasshopper®; Esityskuva Chaos Group: V-ray®.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 13. STL-verkkorakenne [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 14. Orientaatio [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 15. Orientaation vaikutus tukirakenteisiin [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 16. Viipalemalli [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-24.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 17. Laminointi [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 18. Materiaalin pursotus [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 19. Allasvalopolymerisaatio 1 [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 20. Allasvalopolymerisaatio 2 [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 21. Materiaalin ruiskutus [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 22. Materiaalin ja lämmön kohdistus [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 23. Jauhepetiteknikka [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 24. Sideaineen ruiskutus [Vektorigrafiikka].

HINDSBERG, Sanna 2016-04-23.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 25. Muovinen prototyyppi [Digitaalinen valokuva].

HINDSBERG, Sanna 2016-05-16.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 26. Vaha-aihiö [Digitaalinen valokuva].

HINDSBERG, Sanna 2016-05-16.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 27. Vaha-aihiö valettuna hopeaan [Digitaalinen valokuva].

HINDSBERG, Sanna 2016-05-16.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.

KUVANTO 28. Metallituloste [Digitaalinen valokuva].

HINDSBERG, Sanna 2016-05-16.

Kuopio: Saurum Osakeyhtiö.